

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Obrábění dílů z uhlíkových kompozitů

Machining of the Parts from Carbon Composites

Student:

Bc. Miroslav Šilar

Vedoucí diplomové práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2013

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Šilar**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Obrábění dílů z uhlíkových kompozitů**  
**Machining of the Parts from Carbon Composites**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Rozbor současných trendů v teorii obrábění kompozitních dílů.
3. Charakteristika druhů vad a jejich příčiny.
4. Návrh technologie obrábění.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

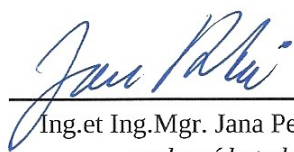
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Aleš Hartman

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

  
Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20.5.2013



.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2013



.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Miroslav Šilar

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Horní Čermná 191, 56156 Horní Čermná

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Šilar, M. *Obrábění dílů z uhlíkových kompozitů: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2013, 79 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Diplomová práce se zabývá problematikou válcového frézování kompozitových materiálů. Hlavním cílem je určit technologii v závislosti na trvanlivosti nástroje při nejvhodnějším povrchu frézovaného reaktoplastu a výběr vhodných nástrojů pro obrábění termoplastu. Tato technologie musí být v souladu s kvalitou obráběného povrchu, kde vlivem frézování dochází k vadám typu nedoříznutých vláken, delaminaci, či dokonce k odlupování povrchu. K získání správnosti a regulérnosti výsledků byly použity nástroje konkurenčních firem zabývajících se zpracováním těchto materiálů. Tato práce reaguje na aktuální stav znalostí týkajících se obrábění uhlíkových kompozitů a dále jej prohlubuje.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

Šilar, M. *Machining of the parts from carbon composites: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2013, 79 p. Thesis head: Petrů, J.

This thesis deals with the cylindrical milling of composite materials. The main objective is to identify the technology depending on the tool life with the most suitable milled surface of the thermoset and selection of appropriate tools for processing of the thermoplastics. This technology has to be in accordance with the quality of the machined surface, where milling can lead to defects such as uncut fiber, delamination or even spalling of the surface. Tools of competitive companies specializing in the processing of these materials were used to obtain accuracy and regularity of the results. This work responds to the current state of knowledge concerning the machining of carbon composites and further expands it.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>1 ROZBOR SOUČASNÝCH TRENDŮ V TEORII OBRÁBĚNÍ</b>                      |           |
| <b>KOMPOZITNÍCH DÍLŮ.....</b>  | <b>12</b> |
| 1.1 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....                         | 12        |
| 1.1.1 Dělení kompozitu podle typu nosného prvku a matrice .....          | 12        |
| 1.1.2 Druhy nosných prvků v kompozitu .....                              | 13        |
| 1.1.2.1 Dělení nosných prvků podle konstrukce.....                       | 14        |
| 1.1.2.2 Dělení podle materiálu.....                                      | 16        |
| 1.1.3 Matrice .....  | 18        |
| 1.1.3.1 Klasifikace termoplastu a reaktoplastu .....                     | 19        |
| 1.1.3.2 Rozdělení pojiv .....  | 21        |
| 1.1.4 Výroba kompozitu .....   | 23        |
| 1.1.4.1 Reaktoplastová výroba.....                                       | 23        |
| 1.1.4.2 Termoplastová výroba .....                                       | 23        |
| 1.2 SPECIFIKA ŘEZÁNÍ KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU .....                        | 24        |
| 1.2.1 Průběh řezu v kompozitních uhlíkových materiálech.....             | 24        |
| 1.2.1.1 Tvorba třísek .....  | 25        |
| 1.2.2 Působící vlivy při obrábění na kompozit .....                      | 25        |
| 1.2.2.1 Vliv teploty .....   | 25        |
| 1.2.2.2 Vliv opotřebení .....  | 26        |
| 1.2.2.3 Vliv řezných sil.....  | 28        |
| 1.2.3 Vrtání .....   | 28        |
| 1.2.4 Frézování .....  | 30        |
| 1.2.4.1 Kinematika řezného procesu .....                                 | 30        |
| 1.3 ŘEZNÉ MATERIÁLY A NÁSTROJE PRO FRÉZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ..... | 31        |
| 1.3.1 Slinuté karbidy .....  | 32        |
| 1.3.1.1 Povlaky .....  | 32        |
| 1.3.2 Super tvrdé nástrojové materiály .....                             | 33        |
| 1.3.2.1 Diamantové povlaky .....   | 34        |
| 1.4 ANALÝZA A PROVĚŘENÍ MOŽNOSTÍ OPTIMÁLNÍ VÝROBY .....                  | 35        |
| 1.4.1 Trvanlivost břitů nástroje.....                                    | 36        |
| 1.4.2 Optimální trvanlivost břitů nástroje.....                          | 37        |
| 1.4.2.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů.....                     | 37        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 1.4.2.2  | Kritérium maximální výrobnosti .....                    | 39        |
| 1.5      | UPÍNÁNÍ KOMPOZITNÍCH DÍLCŮ .....                        | 39        |
| <b>2</b> | <b>CHARAKTERISTIKA DRUHŮ VAD A JEJICH PŘÍČINY .....</b> | <b>40</b> |
| 2.1      | DELAMINACE .....  | 40        |
| 2.1.1    | Určení množství delaminace .....                        | 41        |
| 2.1.2    | Vliv řezných podmínek na delaminaci .....               | 43        |
| 2.2      | NEPŘEŘÍZNUTÁ VLÁKNA .....                               | 44        |
| 2.3      | VLIV TEPLA NA KOMPOZIT .....                            | 44        |
| 2.3.1    | Teplota v místě řezu .....                              | 45        |
| 2.4      | KONTROLA KVALITY KOMPOZITOVÝCH MATERIÁLŮ .....          | 45        |
| <b>3</b> | <b>NÁVRH TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ .....</b>                 | <b>48</b> |
| 3.1      | STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ .....                    | 48        |
| 3.2      | NÁVRH OBRÁBĚCÍCH TESTŮ .....                            | 49        |
| 3.2.1    | Princip testu .....                                     | 50        |
| 3.2.2    | Testy v materiálu reaktoplast .....                     | 52        |
| 3.2.3    | Testy v materiálu termoplast .....                      | 56        |
| <b>4</b> | <b>TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>          | <b>66</b> |
| 4.1      | REAKTOPLAST .....                                       | 66        |
| 4.2      | TERMOPLAST .....  | 72        |
|          | <b>ZÁVĚR .....</b>                                      | <b>74</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                  | <b>76</b> |
|          | <b>PŘÍLOHY .....</b>                                    | <b>79</b> |
|          | <b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>                              | <b>79</b> |

## Seznam použitých značek a symbolů

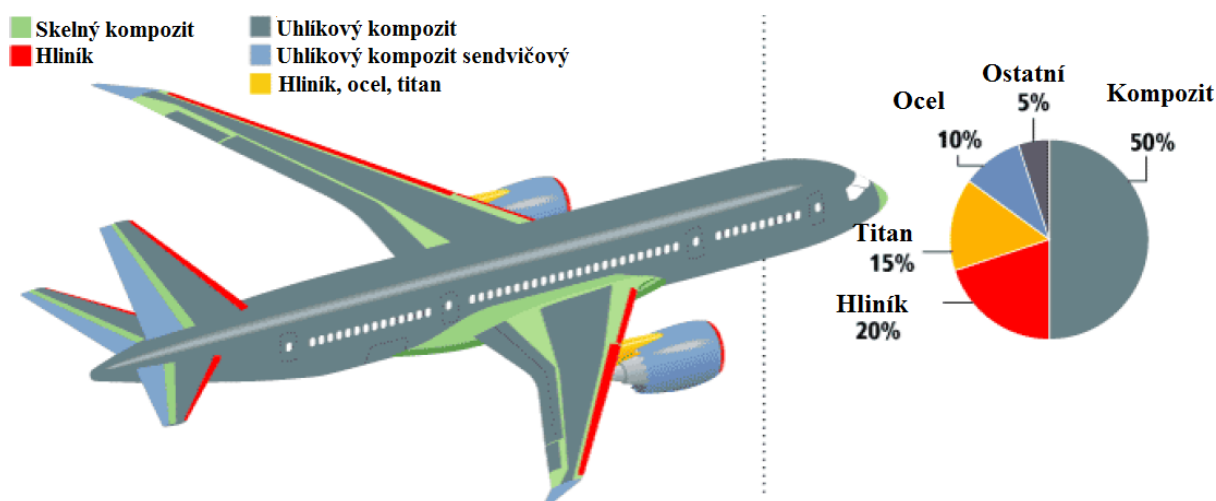
| Zkratka / Symbol | Popis   | Jednotky |
|------------------|---|----------|
| CFRP             | polymeru vyztuženými uhlíkovými vlákny              | [-]      |
| CPC              | Composite Production Center                         | [-]      |
| CVD              | chemické napařování                                 | [-]      |
| E                | modul pružnosti                                     | [ MPa ]  |
| IR               | infračervená termografie                            | [-]      |
| L                | dráha nástroje ve směru posuvu                      | [ mm ]   |
| N                | množství nástroje                                   | [ ks ]   |
| N <sub>c</sub>   | celkové výrobní náklady                             | [ Kč ]   |
| N <sub>cm</sub>  | celkové výrobní náklady na 1m řezu                  | [ Kč ]   |
| N <sub>cn</sub>  | cena nástroje                                       | [ Kč ]   |
| N <sub>n</sub>   | cena nástroje na 1m řezu                            | [ Kč ]   |
| N <sub>nk</sub>  | strojní náklady jednoho dílu                        | [ Kč ]   |
| N <sub>nv</sub>  | náklady na nástroj a jeho výměnu                    | [ Kč ]   |
| N <sub>s</sub>   | strojní práce                                       | [ Kč ]   |
| N <sub>sk</sub>  | nástrojové náklady jednoho dílu                     | [ Kč ]   |
| N <sub>sm</sub>  | náklady na minutu strojní práce                     | [ Kč ]   |
| N <sub>v</sub>   | náklady na vedlejší práci                           | [ Kč ]   |
| PCD/PKD          | polykrystalický diamant                             | [-]      |
| PVD              | fyzikální napařování                                | [-]      |
| Q <sub>T</sub>   | počet kusů obrobených za jednu trvanlivost nástroje | [-]      |
| Rz               | aritmetická střední hodnota drsnosti povrchu        | [ μm ]   |
| T                | trvanlivost nástroje                                | [ min ]  |
| VB               | opotřebení  | [ mm ]   |
| a <sub>e</sub>   | šířka řezu  | [ mm ]   |
| a <sub>p</sub>   | hloubka řezu  | [ mm ]   |



|           |                                     |                       |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------|
| $c_T$     | konstanta v T-vc závislosti         | [ - ]                 |
| $c_v$     | konstanta v T-vc závislosti         | [ - ]                 |
| $d$       | průměr frézy                        | [ mm ]                |
| $f_n$     | posuv na otáčku                     | [ mm ]                |
| $l_n$     | délka náběhu                        | [ mm ]                |
| $l_{nf}$  | délka náběhu frézy                  | [ mm ]                |
| $l_p$     | délka přeběhu                       | [ mm ]                |
| $m$       | materiálová konstanta               | [ - ]                 |
| $n$       | otáčky vřetene                      | [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| $t_A$     | operační čas jednotkové práce       | [ min ]               |
| $t_{AS}$  | strojní čas                         | [ min ]               |
| $t_{AV}$  | jednotkový vedlejší čas             | [ min ]               |
| $t_{Ax}$  | čas jednotkové nepravidelné obsluhy | [ min ]               |
| $v_c$     | řezná rychlost                      | [ m/min ]             |
| $v_f$     | posuvová rychlost                   | [ mm/min ]            |
| $\alpha$  | koeficient teplotní roztažnosti     | [ mm ]                |
| $\lambda$ | tepelná vodivost                    | [ W/m.K ]             |

## Úvod

Kompozity nejsou univerzální materiály. Jsou vždy navrhované pro velmi konkrétní použití s cílem maximálního využití jejich hmoty. Našli široké uplatnění v leteckém průmyslu. Umožnily to jejich vlastnosti, jako je mrazová odolnost a vysoká pevnost. Proto jsou kompozity předurčeny na výrobu nosníků, výztuže křídel a pláště letadel. Zaváděním kompozitu do konstrukce letadel je snaha o zvýšení bezpečnosti letecké dopravy. Dále je výroba letadel z kompozitních dílů i za účelem snížení hmotnosti až o 10 až 15 % u letadla B 787, která vede k úspoře paliva o 5 %.[14] Nesmíme však opomenout ekonomicky vyšší náklady na vývoj, výrobu kompozitní konstrukce a složitost obrábění uhlíkových kompozitů. Vyšší náklady spojené s výrobou kompozitového letadla vyváží pouze sériovost výroby, která se pohybuje mezi 6 až 12 letadly za měsíc, jako u typu Boeing B787, který je prvním celokompozitním letadlem.



Obrázek 1 Rozsah využití kompozitů v letadle Boeing 787 Dreamliner [14]

Kompozitní materiály jsou nehomogenního charakteru a to znamená, že nemají všude podobnou strukturu a vlastnosti. Ze své podstaty je kompozit tvořen ze dvou a více složek. Vlastnosti materiálu jsou lepší, než vlastnosti jeho složek samotných. Materiály splňují požadavky na samozhášivost, dýmavost a toxicitu (výskyt jedů). Při vzniku požáru a dodávání energie k hoření tyto materiály vyvíjí minimum kouře, který není toxický. Je to proto velice dobrý materiál pro užívání v letectví. Nehomogenitou a nízkou tepelnou odolností materiálu vzrůstá náročnost na obrábění. Tepelná odolnost typu zkoumaného kompozitního materiálu

na polymerní bázi matrice nepřesahuje 300°C, a proto jsou omezeny i vysoké řezné rychlosti, aby nedošlo k teplotní degradaci obráběného kompozitu. Pro frézování se užívají řezné materiály ze slinutého karbidu s otěruvzdorným povlakem, nebo materiály na bázi diamantu. Náročnost obrábění vede k zamyšlení nad použitou frézovací strategií. Výběr a stanovení nejvhodnějšího nástroje od dodavatelů přední světové špičky je obtížný, každá firma se považuje za nejlepší s nejlepšími nástroji.

#### CÍL:

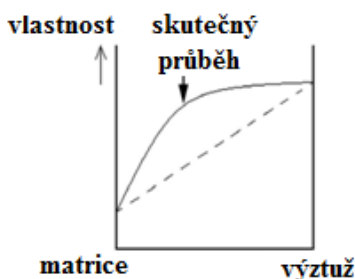
- Hlavním cílem této diplomové práce je stanovení vhodného nástroje pro danou problematiku.
- Výpočet výrobních nákladů pro stávající způsob obrábění a testované nové varianty.
- Na základě získaných poznatků vypracovat obecnější zásady pro drážkové frézování monolitní válcovou frézou reaktoplastových materiálů z epoxidové matrice s uhlíkovými vlákny a termoplastových materiálů.

# 1 Rozbor současných trendů v teorii obrábění kompozitních dílů

## 1.1 Charakteristika kompozitních materiálů

Podle povahy matrice dělíme kompozity do skupin s kovovou, polymerní, keramickou, skleněnou a uhlíkovou matricí. Nejčastěji se používají polymerní matrice. Polymerní kompozity obecně oproti homogenním materiálům sestávají minimálně ze dvou hlavních složek (fází), z nichž každá plní jinou specifickou funkci a má jiné materiálové vlastnosti, většinou značně odlišné.

Kombinací dvou nebo více materiálů (fází) s rozdílnými vlastnostmi lze získat materiály nové, jejichž výsledné vlastnosti jsou výhodnější, než by odpovídalo pouhému součtu vlastností jednotlivých složek (synergický efekt). Ve srovnání s klasickými kovovými materiály je možné zvýšit pevnost (zejména měrnou pevnost), tuhost, lomovou houževnatost, odolnost proti korozi, upravit tepelnou a elektrickou vodivost a redukovat hmotnost. Nevýhodou na druhé straně je zpravidla nízká odolnost vůči vysokým teplotám, přítomnost zbytkových napětí z titulu výrobní technologie atd.



Obrázek 1.1 synergické chování složek kompozitu [8]

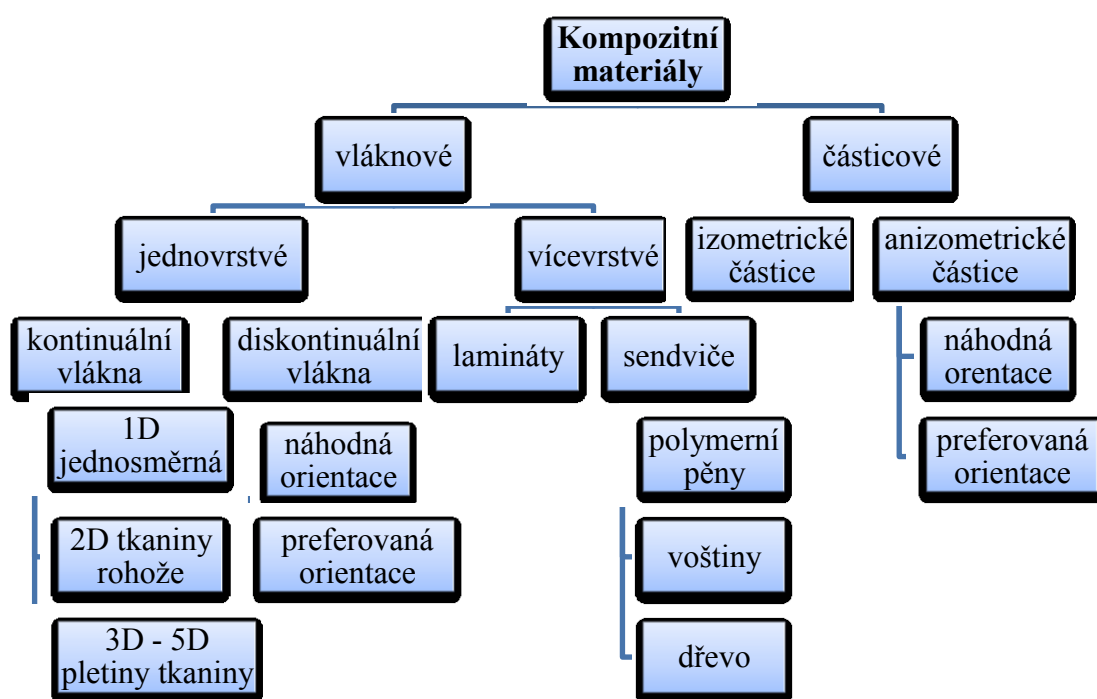
### 1.1.1 Dělení kompozitu podle typu nosného prvku a matrice

**Nosné prvky** tvoří hlavní část mechanických vlastností vytvořeného kompozitu. Jsou to vyztužující vlákna, které dodávají pevnost, tuhost a blokují vznik i růst trhlin ve struktuře. V současnosti se nejčastěji používají skleněná, aramidová (kevlar) a uhlíková vlákna.[6]

**Matrice** (pojivo) je spojitá fáze, která udržuje vyztužující vlákna v požadované poloze. Zajišťuje přenos sil mezi všemi vyztužujícími vlákny a dává materiálu potřebné fyzikální a chemické vlastnosti (elektroizolační a tepelné vlastnosti, chemickou odolnost apod.).[6]

### 1.1.2 Druhy nosných prvků v kompozitu

Nosný prvek se dělí podle konstrukce nebo podle materiálu. Spojení konstrukce vláken a materiálu pro danou aplikaci závisí na mechanických vlastnostech. Každý druh je specifický pro různé použití, proto se dnes nalézá obrovská škála různých druhů tkanin, ve všech možných provedeních. V praxi se nejčastěji používají vícevrstvé kompozity, které se skládají z několika tenkých různě orientovaných jednosměrných vláknových kompozitů. Jsou-li materiály v každé vrstvě stejné, např. skleněná vlákna v epoxidové pryskyřici, nazývá se tento kompozit laminát. V případě, že jsou vrstvy vyrobeny z různých materiálů, například jedna vrstva je vyztužena skleněnými vlákny a druhá uhlíkovými, jedná se o tzv. hybridní lamináty.[5]



Obrázek 1.2 rozdělení podle geometrie výztuže [12]

**Vláknové** polymerní kompozitní materiály jsou ceněny a používány pro svou lehkost při zachování vysokých hodnot pevnosti a tuhosti. Obecně platí, že mechanické vlastnosti kompozitu stoupají se zvyšujícím se obsahem vyztužující složky až do podílu 80 %. Všechna vlákna musejí být totiž dokonale smočena pojivem (pryskyřicí). Aby se využilo plně pevnosti vláken, musí se zabezpečit dobrá adheze mezi vlákny a matricí a tím i dokonalý přenos síly z matrice na výztuž. Vlákna se proto na povrchu chemicky upravují tak, aby se na rozhraní mezi matricí a vláknem vytvořily pevné chemické vazby. Charakteristickým rysem kompozitů oproti homogenním materiálům je jejich anizotropie. To jsou vlastnosti kompozitu silně závislé na směru uložení (orientaci) výztužných vláken.[12]

**Částicové** polymerní kompozity jsou ve tvaru částic. Jeden rozměr útvaru výztuže nepřesahuje výrazně rozměry ostatní. Vyztužující částice pak mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný. Důležité jsou jejich *termomechanické vlastnosti* (teplotní roztažnost, tuhost).[12]

#### 1.1.2.1 Dělení nosných prvků podle konstrukce

Konstrukcí nosných prvků je myšleno uspořádání jednotlivých vláken, nebo pramenců do tkanin, nebo netkaných rohoží. Jednotlivé typy se dělí na:

- tkaniny,
- netkané materiály.

##### Tkaniny

Jsou tvořeny vzájemně protkanými pramenci vláken, kde způsob protkání výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti výrobku. Hlavním rozlišovacím znakem při výběru tkanin je hmotnost na  $1\text{m}^2$  a způsob protkání. U hmotnosti se dá říci, že čím menší hmotnost na  $1\text{m}^2$ , tím jemnější je tkanina. Způsob protkání se nazývá vazba.[23]

Hlavní dělení vazeb je:

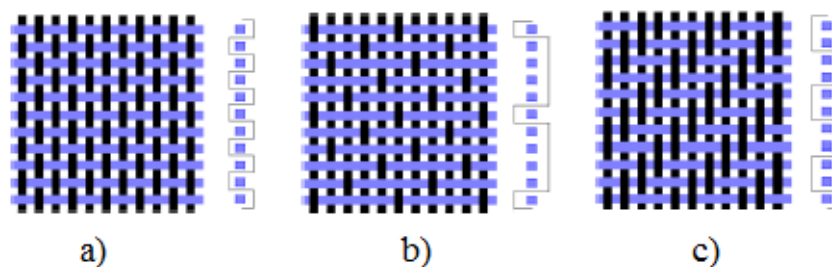
**Jednosměrné** (vlákna jsou orientována převážně v jednom směru):[27]

- krátkovláknové (poměr délka / průměr je  $< 100$ )
- dlouhovláknové (poměr délka / průměr je  $> 100$  nebo je délka vlákna totožná s délkou dílce):
  - prepregy – (nevytvrzenou pryskyřicí proimpregnované vrstvy vláken ve tvaru tenkých pásů různé šířky),
  - tažené profily (tyčovina).

**Mnohosměrné** (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientovány dvěma či více směry):[27]

- krátkovláknové
- dlouhovláknové:
  - *lamináty* (střídání vrstev jednosměrných kompozitu se stejnými nebo různými vzájemnými orientacemi výztuže),

- *lamináty s tkanou výztuží* (vlákna jsou před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi – obr. 1.3),
- *lamináty s netkanou výztuží* (vlákna jsou zpracována do rovin, aniž by byla tkána),
- *tažené profily* (komplikovanější tvary s kombinací vyztužujících vláken).



Obrázek 1.3 schéma vazby a) plátňová b) Saténová c) keprová [11]

### Netkané materiály

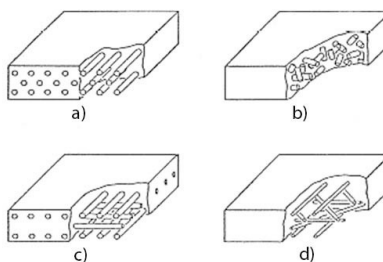
**Rowing:** Jedná se o pramenec vláken používaný na zpevnění některých míst výrobku. Není nijak protkán a dodává se v metráži. Můžeme je volit podle tloušťky jednotlivých vláken v pramenci.[7]

**Netkaná rohož:** Tento materiál se používá při dosažení větší tloušťky materiálu na jedno nanesení. Vyrábí se většinou ze skelných vláken. Výhodou je nízká cena a velikost rozměrových dílů.[7]

### Uspořádání vláken [6]

Významným faktorem ovlivňující zejména pevnost kompozitních materiálů je také uspořádání vláken. Na obrázku je znázorněna následující architektura vláken v kompozitech:

- kontinuální, jednosměrné vlákna,
- krátká vlákna s náhodnou orientací,
- dvousměrné vyztužení (křížová tkanina, rohož),
- vícesměrné vyztužení.



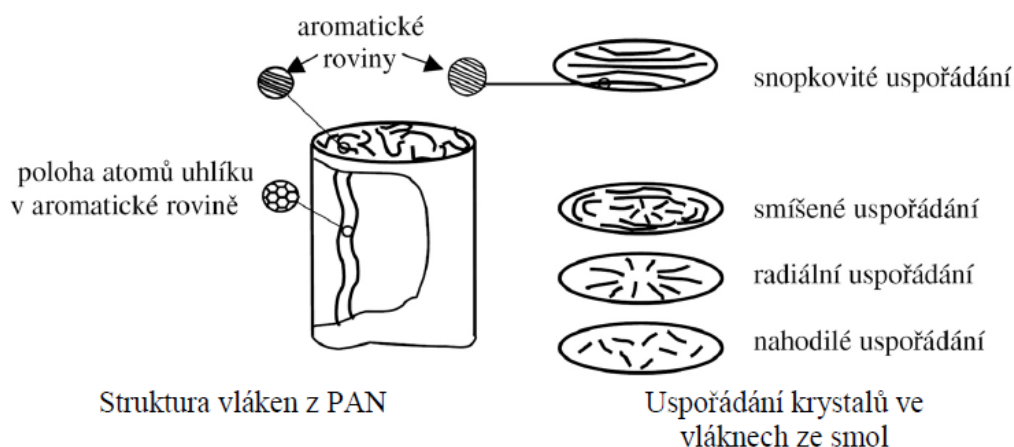
Obrázek 1.4 uspořádání vláken v kompozitních materiálech [6]

### 1.1.2.2 Dělení podle materiálu

#### Uhlíková vlákna

Používají se všude tam, kde je třeba velmi vysoká pevnost a minimální váha. Nevýhodou tohoto materiálu je velmi vysoká cena a také praskání uhlíku. Výhodou je však, že na něm neprobíhá únavové chování.[27]

Uhlíková vlákna jsou krystalická. Podle technologie výroby se rozlišují dva typy uhlíkových vláken: Pitch-vlákna, na jejichž výrobu se používají jako prekurzory (výchozí látky) smoly odpadající při destilaci ropy. Druhým typem jsou PAN vlákna, u kterých se vychází z polyakrylonitrilových vláken jako prekurzoru. Tato vlákna mají lepší mechanické vlastností, ale jsou také dražší. Schematické uspořádání aromatických rovin v uhlíkovém vlákně vyrobeném z PAN a ze smol je na obr. 1.5.[7]



Obrázek 1.5 uspořádání aromatických rovin [5]

Uhlíková vlákna jsou odolná vysokým teplotám, avšak v neoxidujícím prostředí. Pevnost je konstantní až do teploty 2000 °C, modul pružnosti dokonce s teplotou roste. V oxidačním prostředí pevnost vláken rychle klesá již od teplot 500 °C.[5]

Uhlíková vlákna se vyznačují těmito zvláštnostmi:

- anizotropií mechanických vlastností - ve směru kolmém k ose vlákna mají vlákna modul pružnosti výrazně menší, na úrovni hodnot polykrystalického grafitu,
- křehkostí - prodloužení při přetržení je menší než u skleněných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto větší než u skleněných vláken,
- záporným koeficient délkové teplotní roztažnosti  $\alpha$ , tj. při ohřevu se vlákno zkracuje,
- v podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor.[7]



Výroba vlákna - Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN je možno rozdělit do tří etap:

**Stabilizace** - při teplotách 200 až 300 °C, za působení tahového napětí a v oxidačním prostředí je PAN vlákno stabilizováno. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN (vytvoření paralelních žebříkovitých makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vláknem při této etapě zčerná a stane se netavitelným. [7]

**Karbonizace** - při teplotách od 1000 do 1800 °C v inertním prostředí (velice čistý dusík) ve vlákně proběhne karbonizace (odstraní se vodík a sníží obsah dusíku a kyslíku, 80 až 95 % hmoty tvoří uhlík). Vláknem dosáhne maximální pevnosti v tahu.[7]

**Grafitizace** - při teplotách do 3000 °C v inertním prostředí (argon). Ještě více se zvětší obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokystalů. Vyvinutější mikrokristaly vedou k zvětšení tuhosti vlákna.[7]

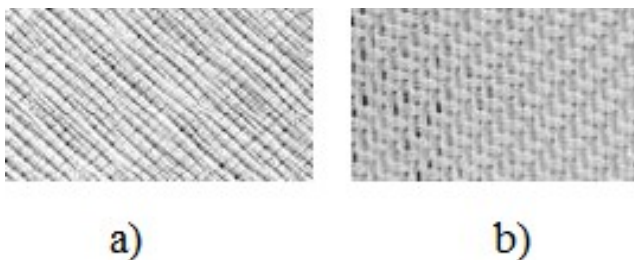
### Skleněná vlákna

Mechanické vlastnosti skelných vláken jsou v porovnání s jinými kompozitními materiály horší. Vláknem se používají v kombinaci s nějakou povrchovou úpravou, protože po nasycení jsou transparentní (průhledný) s jemným odstínem zelené až žluté barvy podle pojiva.[23]

Skleněná vlákna mají silikátový základ oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů křemíku s příměsí oxidů hliníku, vápníku atd. Potřebného průměru vláken se dosáhne proudem skla tekoucího tryskami (průměr trysky 1 mm) ve dnu zvlákňovací hlavy.

V kompozitech jsou používána vlákna:

- odolná kyselinám,
- vlákna dielektrická,
- vlákna odolná alkáliím,
- vlákna se zvýšeným obsahem olova.

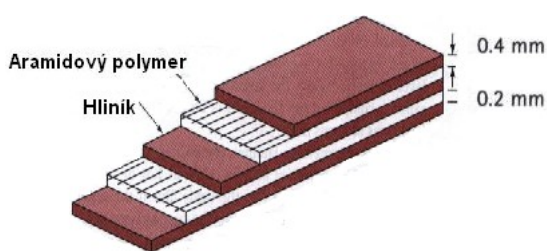


Obrázek 1.6 a) tkanina multiaxial b) tkanina kepr [23]

## Polymerní vlákna (aramidová)

Aramidové vlákno je známé pod obchodním označením Kevlar 29 pro letecké aplikace. Jde o organické vlákno s vysokou pevností a malou měrnou hmotností. Vlákno se vyrábí tak, že polymer rozpuštěný v koncentrované kyselině sírové je vytlačován tryskami do studené vody, kde je propírán a následně sušen na cívkách. Aramidové vlákno je hydroskopické a musí být před impregnací vysušeno.[6]

Oproti skleněným vláknům jsou aramidy mnohem lehčí, to znamená, že jejich pevnost v poměru k váze (specifická pevnost) je několikanásobně větší. Mají rovněž dvojnásobně větší modul a vynikající schopnost absorbovat energii. Kompozity vyztužené aramidovými vlákny se proto používají pro dynamicky namáhané aplikace zejména v dopravních prostředcích a jako ochranné vrstvy proti střelám v prostředcích osobní ochrany i ochraně vojenské techniky. K dělení kevlarových plátů slouží nůžky s mikrozoubky, které nedovolují klouzáni jednotlivých vláken a dochází ke střihu vlákna. Po vytvrzení je jediným efektivním dělením řezání vodním paprskem.[23]



Obrázek 1.7 struktura aramid - hliníkového kompozitu [23]

### 1.1.3 Matrice (pojiva)

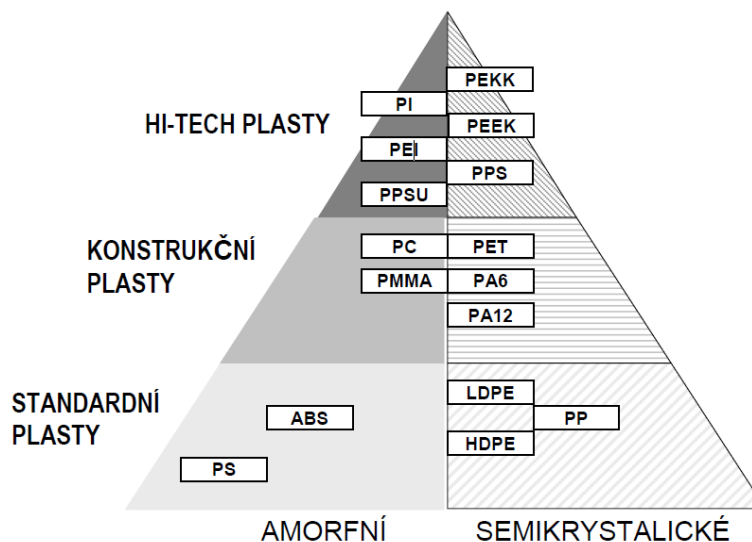
Hlavní úlohou matrice je zajištění celistvosti kompozitního tělesa, tj. dokonalé spojení nosné části a vytvoření vnějšího tvaru, který musí zajistit řádnou funkci tělesa. Materiálové vlastnosti matrice a vláken musí být v souladu pro dosažení optimálních vlastností celého kompozitu. Specifické funkce matrice je možné vyjádřit v několika bodech:

- spojuje vlákna (resp. částice u částicových kompozitů) v kompaktní celek,
- zprostředkuje zatížení vláken: 1) v místech vnějšího zatížení, 2) v místech přerušení vláken, 3) mezi vlákny u krátkovláknových kompozitů, 4) mezi vlákny nerovnoměrně zatíženými, přemost'uje trhliny ve vláknech atd.,
- vytváří vnější funkční povrch tělesa a estetický vzhled včetně barvy.

Nejčastěji používané polymerní matrice se rozdělují na dvě základní charakteristické skupiny a to: **reaktoplasty a termoplasty**.

### 1.1.3.1 Klasifikace termoplastu a reaktoplastu

Termoplast:



Obrázek 1.8 typy matric [25]

**Termoplasty**, kterými jsou například polystyren (PS), polypropylen (PP), polyetylén (PE), polykarbonát (PC), polyetylén tereftalát (PET) a další, jsou tuhé látky, které měknou a tečou při zvýšení teploty nad jistou charakteristickou teplotu. Po ochlazení opět přejdou do pevného skupenství. Charakteristickým strukturním znakem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly (makromolekuly) vytvořené opakováním stejných strukturních jednotek (několik tisíc až několik milionů). Z toho důvodu bývá tento typ makromolekul označován jako polymer. Jednotlivé makromolekuly nejsou vzájemně vázány chemickými vazbami. Jejich vzájemné interakce (působení), které zaručují kohezní pevnost polymerního tělesa, jsou většinou slabé, van der Waalsovské interakce, vodíkové můstky, atd. Nevýhodou je vysoká viskozita při zpracování, která je o 2-4 řády větší než u reaktoplastů, což přispívá ke vzniku defektů, jako jsou bubliny, nesmočené pramence vláken atd. Zlepšení se dosáhne použitím termoplastem předimpregnovaného vlákna, což ale zvyšuje cenu. Výhodou je vysoká tažnost. Mechanické vlastnosti vybraných termoplastů jsou uvedeny v tab. 1. [6]

Semikrystalický termoplast:

- částečná krystalická struktura,
- vyšší pevnost a chemická odolnost,
- nižší viskozita při zpracování,
- větší změna objemu.

Amorfní termoplast:

- horší zpracovatelnost.

**Tab. 1: Mechanické vlastnosti matric [25]**

| typ pojiva              | zkratka | teplota<br>skelného<br>přechodu | teplota<br>tavení | teplota<br>zpracování | typ morfologie  |
|-------------------------|---------|---------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
|                         |         | °C                              | °C                | °C                    |                 |
| polypropylen            | PP      | -4                              | 170               | 191-224               | semikrystalický |
| plexi                   | PMMA    | 100                             | --                | 199-246               | amorfní         |
| polyamid                | P6A     | 60                              | 216               | 246-274               | semikrystalický |
| polyamid                | PA12    | 55                              | 178               | 200-240               | semikrystalický |
| polyfenylen-sulfid      | PPS     | 88                              | 285               | 329-343               | semikrystalický |
| úpůyeterimid            | PEI     | 218                             | --                | 316-360               | amorfní         |
| polyetereter-keton      | PEEK    | 143                             | 345               | 382-399               | semikrystalický |
| polyetereter-ketonketon | PEEK    | 156                             | 310               | 327-360               | semikrystalický |

**Reaktoplasty**, jakými jsou například epoxidy, nenasycené polyestery, melaminy či fenol formaldehyd, jsou obvykle dodávány ve formě viskózních tekutin s konzistencí řídkého medu. Jsou tvořené relativně malými molekulami, které se vytvrzují chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Vytvrzuje se buď za pokojové teploty, nebo za zvýšených teplot. Způsob, kterým vytvrzování probíhá, do značné míry ovlivňuje vlastnosti výsledného reaktoplastu. Jelikož při vytvrzování dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými malými molekulami, vzniká místo dlouhých lineárních molekul, které jsou charakteristické pro termoplasty, třidimenzionální polymerní síť s různou hustotou. V ideálním případě je celý makroskopický výrobek jedinou makromolekulou. Tento fakt způsobuje, že vytvrzený reaktoplast zůstává v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho odolnost proti creepu a vysokým teplotám, i když to na druhé straně zvyšuje i jeho křehkost a omezuje recyklovatelnost.[6]

**„Tab. 2: Rozdíl v kompozitech“:[25]**

| <i>REAKTOPLASTY</i>                               | <i>TERMOPLASTY</i>  |
|---|---|
| <i>výroba dílu je nevratný chemický proces</i>    | <i>opakovatelný výrobní proces</i>                        |
| <i>skladování polotovarů vyžaduje mrazicí box</i> | <i>neomezený čas skladování za normálních podmínek</i>    |
| <i>zavedená technologie</i>                       | <i>nová netradiční technologie</i>                        |
| <i>relativně křehký materiál</i>                  | <i>houževnatý materiál</i>                                |
| <i>pevnost v tlaku je výborná</i>                 | <i>pevnost v tlaku je dobrá</i>                           |
| <i>únavová životnost je výborná</i>               | <i>únavová životnost je dobrá</i>                         |
| <i>tolerance poškození je dobrá</i>               | <i>tolerance poškození je výborná</i>                     |
| <i>dielektrické vlastnosti jsou dobré</i>         | <i>výborné dielektrické vlastnosti</i>                    |
| <i>absorbuje vodu až 2 %</i>                      | <i>absorbuje vodu jen do 0,1 %</i>                        |
| <i>teplota zpracování 120-200 °C</i>              | <i>teplota zpracování je 320-420 °C</i>                   |
| <i>dobu vytvrzování je dlouhá</i>                 | <i>velmi krátká doba zpracování</i>                       |
| <i>tlak pro zpracování je do 0,7 MPa</i>          | <i>tlak pro zpracování je do 2 MPa</i>                    |
| <i>fixace vrstev při skladbě po sekvencích</i>    | <i>fixace každé vrstvy při skladbě</i>                    |
| <i>skladba v čisté místnosti</i>                  | <i>skladba v normálních podmínkách</i>                    |
| <i>spojování lepením nebo mechanickými spoji</i>  | <i>spojování lepením, mechanickými spoji a svařováním</i> |

### **1.1.3.2 Rozdělení pojiv**

Jako pojivo se většinou používá tekutina. Po technologickém zpracování pojivo ztuhne a změní se v pevnou látku. Ztuhnutím zafixuje polohu jednotlivých vláken nosného prvku. Pojivo je většinou nejslabším článkem v kompozitu, proto se snažíme, aby jeho obsah byl v kompozitu co nejmenší. Nesmí se ale překročit správný poměr, kdy pojiva bude tak málo, že nebude spojovat jednotlivá vlákna. Nejčastější pojiva jsou epoxidové a polyesterové pryskyřice. Objevují se i nová pojiva na bázi fenolových a silikonových pryskyřic, která mají velmi dobré vlastnosti. Fenolové pryskyřice se používají například u prepregu (polotovaru k výrobě vláknových kompozitů), kde se aktivují tlakem a teplotou. Dále se dá jako pojivo použít například polyamid Pa66, který se plní například skelnými nebo uhlíkovými vlákny. Směs tohoto polyamidu se následně vstříkuje do forem na vstříkolisech.[23]

## **Epoxidové pryskyřice**

Jedná se o dvousložkové pryskyřice, kde jedna složka je hlavní a přidává se tužidlo. Obvyklý poměr mísení je 100:50 (hmotnostně). Pro jeden typ hlavního komponentu existuje několik druhů tužidel. Doba zpracování se pohybuje od 30 min až do 10 hodin podle typu tužidla a hlavní složky. Doba vytvrzení pak od 1 hodiny do 24 hodin. Epoxidové pryskyřice mají větší pevnost. Při zpracování jsou zdravotně nezávadné. Odpadá nepohodlná práce v dýchací masce. Některé druhy jsou přímo certifikovány pro styk s potravinami, nebo pitnou vodou. Některé typy mají zase certifikaci pro letecký průmysl. Jejich největší nevýhodou je vysoká cena.[23] Mají vynikající mechanické a elektrické vlastnosti a jsou běžně používány s kvalitními výztužemi např.: s uhlíkovými nebo skelnými vlákny, pokud je podíl výztuže velmi vysoký. Mají dobře elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot, cenná je i jejich značná odolnost proti vodě, roztokům alkálií i kyselin a některým rozpouštědlům.

## **Polyesterové pryskyřice**

Jsou dvousložkové, složené z polyesterové složky určující převážnou část vlastností a dále složky vytvrzovací. Vytvrzovací bývají různé druhy peroxidu. Polyesterové pryskyřice mají obecně nižší pevnost, než epoxidové. Jejich výhodou je oproti epoxidové pryskyřici podstatně nižší cena a velmi dobrá probarvitelnost. Nevýhodami při zpracování polyesterové pryskyřice je velmi silný zápach a po odformování rozměrnějších dílců dochází k mírné deformaci tvaru.[23] Nenasycené polyester jsou nejčastěji používanou matricí pro vyztužené plasty zvláště v kombinaci se skelnou výztuží. Polyesterové pryskyřice mají dobré mechanické, elektrické a chemické vlastnosti. Polyester jsou dobré do slabě kyselého prostředí.

## **Vinylestery**

Vinylesterové pryskyřice kombinují nejlepší charakteristiky polyesterových a epoxidových pryskyřic. Vinylestery mají dobrou odolnost v kyselém i alkalickém prostředí, zvláště ve vysokých teplotách. Skelným vláknem vyztužené vinylesterové profily mají dobrou elektrickou a tepelnou izolaci. Na epoxidech založené vinylesterové pryskyřice mají dobrou chemickou odolnost ve zvýšených teplotách. Maximální doporučená provozní teplota je 90-50 °C.[7]

#### **1.1.4 Výroba kompozitu**

Ve výrobní technologii CPC (Composite Production Center) je proces řízen v reálném čase. Výroba se liší podle druhu matrice zpracovávaného kompozitního materiálu. Matrice je tvořena výše zmíněným pojivem termoplastovým nebo reaktoplastovým.

##### **1.1.4.1 Reaktoplastová výroba**

Díly s reaktoplastickou matricí (autoklávová technologie) vznikají skládáním a formováním tzv. prepregů za použití vakuového systému. Polotovary pro skladbu jsou za přísných podmínek řezány na plotrech v prostorách čisté místnosti. Tyto polotovary se umístí na formu, která se následně podrobí vytvrzovacímu cyklu v autoklávu. Vytvrzený polotovar se po kontrole vnitřních a vnějších vad obrobí na pětiosém obráběcím centru a po další mezioperační kontrole se provede povrchová úprava, značení, montáž a expedice.[4]

##### **1.1.4.2 Termoplastová výroba**

Díly s termoplastovou matricí – technologie termoforming – vznikají lisováním na hydraulickém termolisu. Zde je polotovarem rovná kompozitní deska, ze které se vodním paprskem vyřízne vhodný formát pro daný díl. Po vylisování a kontrole vnitřních a vnějších vad jsou díly obráběny na pětiosém obráběcím centru nebo víceosém vodním paprsku. Následuje kontrola obrobené geometrie a povrchové úpravy. Po finálním značení jsou díly připraveny k montáži a následné expedici.[4]

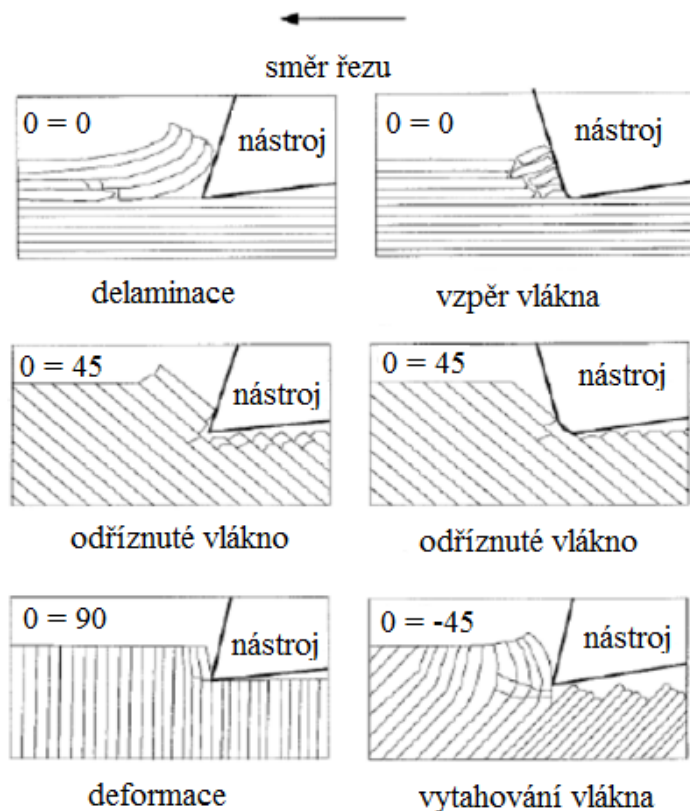
Díly z termoplastu jsou vyztuženy nekonečným vláknem. Mohou být použity různé polotovary. Při vytváření dílů z jednotlivých vrstev se používá prepreg, což je výztuž, která je již prosycena matricí. Pro méně náročné aplikace se používá tkanina z výztuže, která má ve vazbě rovněž pramence termoplastu. V letectví je zatím nejvíc používaným polotovarem kompaktní rovná monolitní kompozitní deska, která již má předepsanou skladbu vrstev. Technologie zpracování je ve všech případech v principu podobná. Polotovar se ohřeje na teplotu zpracování a zalisuje se ve formě. Takový proces se nazývá termoforming a trvá od 3 do 10 minut. Dojde k rychlému ohřevu i ochlazení v konečném tvaru výrobku.[4]

## 1.2 Specifika řezání kompozitního materiálu

Technologie, materiál a konstrukce součásti se vzájemně ovlivňují a mají výsledný vliv na celkovou funkci výrobku. Nelze zvolit materiál bez ohledu na jeho použití a nelze zvolit správnou technologii výroby bez znalostí vlastností materiálu. Technologie ovlivňuje docílení požadovaného tvaru součásti, přesnost, kvalita povrchu a v neposlední řadě i cenu. Konstrukce výrobku zase ovlivňuje výběr materiálu i technologii.[23]

### 1.2.1 Průběh řezu v kompozitních uhlíkových materiálech

Při obrábění kovů dochází ke kluzu a výrazné plastické deformaci při tvorbě třísky. Naproti jsou kompozitní materiály zpravidla roztrhávána a to tak, že matrice je přerézávána a pevná vyztužující vlákna se během obráběcího procesu lámou. Proto se zpravidla používají pro obrábění kompozitů nástroje s ostrým úhlem břitem, pozitivním úhlem čela a dostatečně velkým úhlem hřbetu umožňujícím čistý řez a snižují opotřebení nástroje, což je důležité i pro kvalitu obráběné součásti.[1]



Obrázek 1.9 Orientace vláken a jejich dělení v závislosti na úhlu obráběcího nástroje:[1]



### **1.2.1.1 Tvorba třísek**

Při obrábění kompozitních materiálů nevzniká pouze drobná tříska, ale vytváří se také drobné částčky třísek v podobě hrubého prachu, které se šíří z místa řezu do okolí. Vzniklý prach a třísku je potřeba odvádět z místa řezu procesní kapalinou nebo vzduchovým odsáváním. To vyžaduje aplikovat výkonná odsávací zařízení, aby nebyly překročeny zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí.[1] Procesem dochází ke vzniku tepla. U obrábění kompozitu je teplota z místa řezu odváděna nástrojem. U kovu je teplota odváděna z místa řezu ve formě třísek.

Mechanismus vzniku třísky je vedle řezné rychlosti, geometrie nástroje a řezného prostředí, závislý hlavně na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu. Obráběné kompozitní dílce jsou vyztužené uhlíkovými vlákny (v různé formě, orientaci i obsahu), které jsou vázána polyesterovou nebo epoxidovou pryskyřicí.

### **1.2.2 Působící vlivy při obrábění na kompozit**

Obrábění kompozitních materiálů se zásadním způsobem liší od konvenčního obrábění kovů. Je obvyklé, že obrobitelnost různých druhů kompozitů je značně rozdílná.

Problematika v obrábění uhlíkových kompozitů:

- špatná tepelná vodivost a z toho plynoucí tepelné namáhání nástroje i obrobku,
- vysoká abrazivnost uhlíkových vláken i matrice obrobku a jejich vliv na životnost nástroje,
- velikost řezných sil s ohledem na tenkostěnnost, vrstevnatost a štíhlost obrobku.

#### **1.2.2.1 Vliv teploty**

Pro obrábění je nezbytné respektovat teplotní omezení matrice. Při překročení teploty 80°C (výjimečně 150°C) dochází k její degradaci a výraznému zhoršení mechanických vlastností kompozitu. Kompozity vykazují nízkou tepelnou vodivost, která činí zhruba 0,2-0,4 W/m.K oproti oceli, kde jsou běžné hodnoty 52–53 W/m.K, a tudíž je nutno se

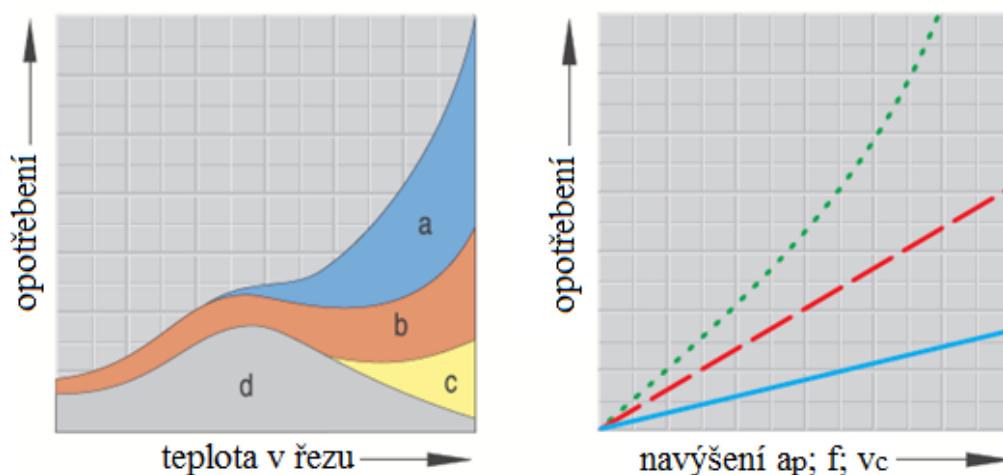
vyvarovat místního přehřátí. Teplo z místa řezu se odvádí především nástrojem.[21] Ke snížení teploty známe dva základní typy přívodu procesního média. U vnějšího chlazení je procesní medium přivedeno ze strany do místa řezu. U vnitřního chlazení je efektivní přísun procesního média středem nástroje do místa řezu. Novodobou technologií je způsob dodávání vzduchu do místa řezu pomocí drážek. Standardní způsob dodávání média středem nástrojů prostřednictvím kanálků je zde nahrazen lineárně orientovanými drážkami po obvodu nástroje monolitních fréz viz obr. 1.10. Suché (neupravený nebo upravený vzduch) tlakové chlazení je použito u průměrově menších nástrojů, kde z technologických důvodů není možné vyrobít vnitřní chlazení.



Obrázek 1.10 nástroj s lineárními axiálními kanály pro vedení procesní kapaliny [10]

### 1.2.2.2 Vliv opotřebení

Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměru tuhých těles, vyvolaná vzájemným působením funkčních povrchů. Vzniká současným působením mechanického a tepelného namáhání řezné hrany. Opotřebení se projevuje odstraňováním nebo přemísťováním částic hmoty z povrchu součásti hlavně mechanickými účinky působících sil doprovázenými někdy i jinými vlivy, např. chemickými nebo elektrochemickými. Intenzita mechanických typů opotřebení je závislá na poměru tvrdosti obráběného materiálu a slinutého karbidu za podmínek, které existují v kontaktních plochách mezi břitkem a obráběným materiálem.[15] Známe různé druhy opotřebení, které se v technické praxi obvykle kombinují. Jeden druh přechází v jiný, takže vzniká řada variant.

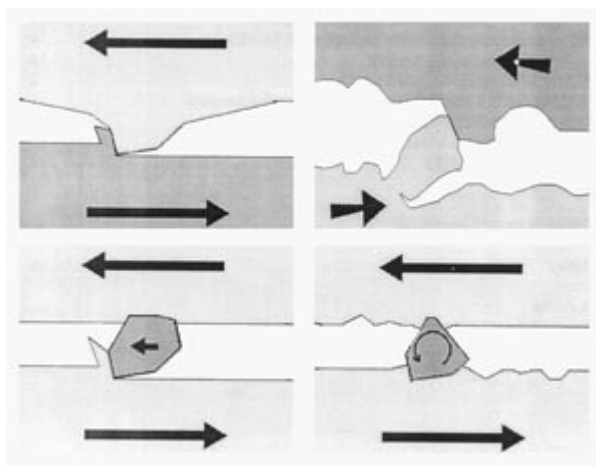


Obrázek 1.11 graf opotřebení v závislosti na teplotě řezu pro kovy[9]

- |                      |                     |
|----------------------|---------------------|
| a) Difúze            | ■ Řezná rychlost    |
| b) Mechanický otěr   | ■ Posuvová rychlost |
| c) Oxidace           | ■ Hloubka řezu      |
| d) Odlomení nárůstku |                     |

Tento graf opotřebení nelze plně uplatnit i pro obrábění kompozitového materiálu. Na rozdíl od kovu nedochází k opotřebení vlivem *nárůstku* a *difúzi* jen nepatrné. Nárůstek se netvoří, protože materiály nejsou příbuzné. To znamená, že nedochází k navaření částic obrobku na materiál nástroje a odlomení břitu společně nárůstkem. Principem difúze je migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje, ke které u obrábění kompozitu téměř nedochází.

Vyztužující vlákna působí na nástroj silným abrazivním účinkem a jsou jedním z největších příčin intenzivního opotřebení břitu nástroje, který výrazně ovlivňuje kvalitu obrobku. Vliv opotřebení je dokonce větší než vliv geometrie nástroje a řezné rychlosti. Schopnost břitu odolávat abrazivnímu otěru je závislá na jeho tvrdosti. Řezný materiál obsahující hustou strukturu tvrdých částic odolává abrazivnímu opotřebení lépe. Na velikost a rychlost opotřebení má vliv množství, tvar, velikost a tvrdost abrazivních částic mezi opotřebovávanými povrchy. Tento druh opotřebení je typický pro případy, kdy se stýkají dva povrchy a přitom jeden nebo oba jsou drsné a tvrdé. Dále jsou-li mezi dvěma povrchy přítomny volné tvrdé částice, nebo kdy jde o zpracovávání materiálu s tvrdými částicemi.[22]



Obrázek 1.12 mechanizmy abrazivního opotřebení [22]

### 1.2.2.3 Vliv řezných sil

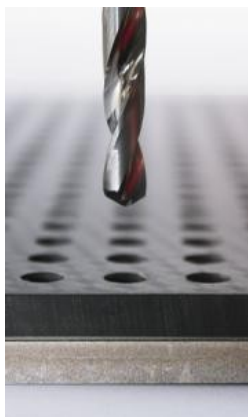
Problémem řezných sil zejména při frézování obvodovém, jsou axiální síly, podporující separaci povrchových vrstev. Proto je žádoucí, aby složka řezné síly působící kolmo na jednotlivé vrstvy kompozitu nezpůsobila separaci těchto vrstev, tzv. delaminaci. „U kompozitu s dlouhými, jednosměrně orientovanými vlákny je vhodné zvážit směr působení řezné síly s ohledem na orientaci vláken tak, aby eventuálně vzniklá porucha směřovala do míst, která budou odstraněna dalším opracováním.“ Doporučuje se užívat tzv. kompresních fréz, jejichž zuby jsou uspořádány ve šroubovicích opačného směru; tak lze docílit toho, že při práci jsou oba vnější povrchy axiální složkou řezné síly stlačovány k sobě a nebezpečí separace vrstev nehrozí.[21]

## 1.2.3 Vrtání

### Princip

Vrtání je výrobní metoda, u které se zhotovují díry do plného materiálu nebo se zvětšují již jinak vyrobené díry. Hlavní pohyb je rotační a vykonává ho nástroj, vedlejší (posuvový) pohyb vykonává nástroj ve směru své osy. Zpravidla kolmá k obráběné ploše je osa vrtáku, ve které vstupuje vrták do obráběného materiálu. Při vrtání kompozitních materiálů jsou využívány různé typy zařízení a také vrtáky, které jako obráběcí nástroje prošly intenzivním technologickým vývojem. Požadavky na utváření a odvádění třísky při procesu vrtání jsou

mnohem vyšší než u frézování. Charakteristickou vlastností všech nástrojů na díry je, že řezná rychlost se podél hlavního ostří, ve směru od obvodu ke středu nástroje, zmenšuje. Za řeznou rychlost se považuje obvodová rychlost na vnějším průměru nástroje.[20]



Obrázek 1.13 vrtání kompozitu [18]

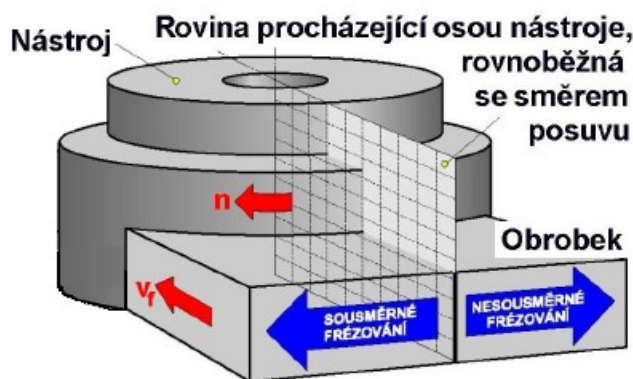
Používané kvalitativní parametry vrtané díry do kovových materiálů nelze přímo aplikovat také na vrtání kompozitů. U kompozitních materiálů nedochází totiž ke vzniku třísek a konvenční posuzování kvality opracování obvykle není vhodným ukazatelem. Kvalita díry je spojována s množstvím zbytkových vyčnívajících částí vláken uvnitř otvoru (třepením) a stupněm delaminací na výstupu z díry. Tyto vady však nejsou přímo měřitelné, a navíc představují složitý problém z hlediska vytvoření podmínek pro správný záběr obráběcího nástroje. Dříve dochází ke zhoršení kvality díry, než jsou na nástroji patrné známky opotřebení.[18]

Pro vrtání CFRP (carbon fiber reinforced polymer) polymeru vyztuženými uhlíkovými vlákny a kompozitních materiálů s kovovými vrstvami byl vyvinut nejmodernější typ vrtáku, který využívá technologii armování. Tato technologie umožňuje přímou integraci (polykrystalického diamantu PCD) břitů do karbidového těla vrtáku. Jedná se o moderní high-tech metodu, využívající patentovaný postup, který umožňuje dosažení nejlepší funkce tvrdých, otěruvzdorných PCD břitů usazených v houževnatější karbidové stopce. Břit je vložen až do určité vzdálenosti od špičky, která je dostatečně velká, aby umožnila použití vysoce pevného pájeného spoje. Nabroušená část PCD břitu nástroje je chráněna do určité míry karbidovou částí vrtáku.[18]

## 1.2.4 Frézování

### Princip

Základní principy frézování kompozitu vycházejí z obrábění kovu. Je to obráběcí metoda, při které je materiál obrobku odebírán břity rotujícího nástroje. Posuv nejčastěji koná obrobek, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozlišuje frézování válcové a frézování čelní. [9]



Obrázek 1.14 válcové frézování [9]

### Technologie frézování

*„Válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny pouze po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy“.* [9] Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří vycházejícím zubem ze záběru. Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem.

#### 1.2.4.1 Kinematika řezného procesu [9]

Hlavní, rotační pohyb u všech druhů frézování koná nástroj, posuvový pohyb je většinou přímočarý a koná ho obrobek. Hodnota řezné rychlosti  $v_c$  se vypočítá podle vztahu:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \quad [\text{m/min}] \quad (1.1)$$

$D$  [mm] - průměr nástroje

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] - otáčky nástroje

Základní jednotkou posuvového pohybu je posuv na zub  $f_z$ , což je délka dráhy, kterou ujede obrobek po dobu záběru zubu. Z posuvu na zub lze vypočítat posuv na otáčku  $f_n$ :

$$f_n = f_z \cdot z \quad [\text{mm}] \quad (1.2)$$

$z$  [-] - počet zubů (břitů) nástroje

Posuvová rychlost se vypočítá podle vztahu:

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm/min}] \quad (1.3)$$

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] – otáčky nástroje

### 1.3 Řezné materiály a nástroje pro frézování kompozitních materiálů

Obrábění kompozitních materiálů je obtížné, volba vhodných řezných nástrojů a technologických podmínek vyžaduje pečlivý přístup. Kromě geometrie a materiálu řezného nástroje mají značný vliv na kvalitu obrábění kompozitních materiálů i řezné podmínky. Záleží na správně zvoleném posuvu a otáčkách, aby byl zajištěn správný řez. Při obrábění těchto materiálů je třeba zamezit tření nástroje o povrch obrobku. Pokud nástroj neřeže správně, dochází k delaminaci nebo lámání vláken.[1]

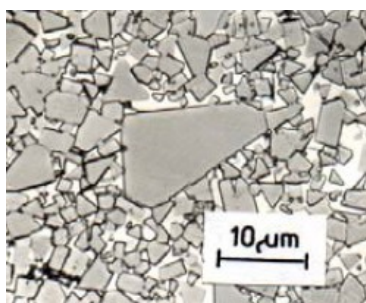
Uhlíková vyztužující vlákna jsou velmi abrazivní. Je vyžadován co nejvíce otěruvzdorný nástrojový materiál, který spolu se správnou geometrií sehrává klíčovou roli. Použité nástroje musí mít pozitivní geometrii a velmi ostrý břit, aby nedocházelo k třepení či delaminaci na styku opracované a neopracované plochy.

**Tab. 3: Odvod tepla při obrábění kompozitních materiálů ve srovnání s ocelí.[5]**

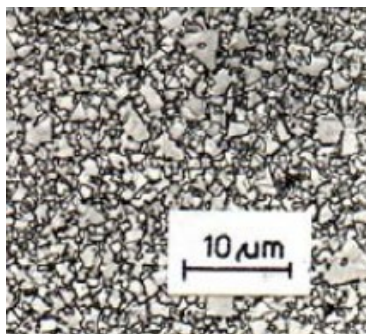
| Odvod tepla | Ocel %               | Termoplast % | Reaktoplast % | CFRP % |
|-------------|----------------------|--------------|---------------|--------|
| Třískou     | 75                   | 50-57        | 2-3           | 8-9    |
| Obrobkem    | 20-22                | 5-8          | 5-10          | 10-15  |
| Nástrojem   | 3-5                  | 20-25        | 70-80         |        |
| Prostředím  | 3-5 (suché obrábění) |              |               |        |

### 1.3.1 Slinuté karbidy ( SK )

„Nástroje ze slinutých karbidů dosahují lepších výsledků v porovnání s nástroji z rychlořezných ocelí. Mechanické vlastnosti slinutých karbidů závisí zejména na obsahu pojiva (nejčastěji Co-kobalt) a velikosti zrna karbidické fáze” (obr. 1.15). Tvrdost se zvyšuje s vyšším podílem a jemnějším zrnem karbidické fáze. Naopak velká zrna a větší podíl pojiva zvyšuje houževnatost slinutého karbidu. Pro účely obrábění kompozitních materiálů vyztužených abrazivními vlákny (uhlíková, skleněná) jsou vhodné především jemnozrnné slinuté karbidy (obr. 1.16), které mají vyšší hodnoty tvrdosti a odolávají tak lépe opotřebení.[5]



Obrázek 1.15 velikost zrna hrubozrnný [9]



Obrázek 1.16 velikost zrna jemnozrnný [9]

#### 1.3.1.1 Povlaky

##### Princip výroby

Povlakované slinuté karbidy jsou vyráběny tak, že na podkladový materiál se nanáší tenká vrstva materiálu s vysokou tvrdostí a vynikající odolností proti opotřebení. Povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě.



Povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů (póry, dutiny) a tvoří bariéru proti difúznímu mechanismu opotřebení nástroje. Povlakování se dělí do dvou základních skupin: [16]

**Metoda CVD** (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze). Napařování probíhá za vysokých teplot (nad 1000 °C). Vývoj CVD metody vede ke kvalitativní změně technologie:

- Plazmaticky aktivovaní CVD metoda – probíhá za teploty 600°C.
- Middle Temperature CVD metoda – probíhá za teplot 700 – 850°C.

**Metoda PVD** (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) je charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 600 °C, podle některých pramenů i 350 °C).

### **Multivrstvé povlaky**

Vysokých trvanlivostí a sní spojených vysokých úběrů obráběného materiálu, dosahují břitové destičky ze slinutých karbidů s tzv. multivrstvými povlaky. Jsou založeny na principu pravidelného střídání dvou typů vrstev s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (tloušťky jednotlivých "monovrstev" jsou přitom velmi malé, kolem 10 nm). Fyzikální vlastnosti výsledné multivrstvy jsou pak výrazně odlišné od vlastností homogenní monovrstvy stejného průměrného složení. Například multivrstvý povlak nikl – diamant.[16]

### **Nanokrystalické kompozity**

Dalším vývojem multivrstvých povlaků vznikly tzv. nanokrystalické kompozity, u nichž jsou mikrostrukturní a prostorové rozměry sníženy do nanometrických dimenzí. Jsou složeny z více druhů materiálů, jejichž vzájemná rozpustnost je minimální.[16]

## **1.3.2 Super tvrdé nástrojové materiály**

### **Polykrystalický diamant (PKD)**

Protože diamant má poměrně nízkou teplotní stálost (při dosažení teplot nad 800 °C se mění na grafit), nesmí být používán pro obrábění materiálů na bázi železa (oceli, litiny). Nadměrným ohřevem by docházelo k silné difúzi mezi nástrojem a obráběným materiálem. Difuze vede k velmi rychlému opotřebení v důsledku probíhajících chemických reakcí, které

jsou převážně na čele nástroje.[9] Aplikační možnosti polykrystalického diamantu při obrábění neželezných materiálů jsou velmi široké:

- Zejména u materiálů s vysokým obsahem křemíku, který působí na nástroj velmi silným abrazivním účinkem.
- Kompozity vyztužené různými druhy vláken (skleněná, uhlíková, aramidová - Kevlar, polyetylenová).

Nejlepších výsledků při obrábění kompozitních materiálů dosahují nástroje osazené řeznými prvky z polykrystalického diamantu (tzv. připájené roubíky), nebo opatřené diamantovými povlaky. Především vysoká tvrdost diamantu umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu účinku vyztužujících vláken. Vynikající tepelná vodivost zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu. Tyto dvě vlastnosti jsou předpokladem pro vysokou kvalitu obrobeneho povrchu a dlouhou trvanlivost nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší (až stonásobně) než u nástrojů ze slinutých karbidů. Ostrý břit, který vydrží po dlouhou dobu obrábění, poskytuje chladnější řez a snižuje tvorbu delaminace. Při nadměrném opotřebení břitu se vlákna spíše odlamují, místo aby byla běžně řezána. Vhodnou aplikací nástrojů z PKD dochází ke zvýšení řezných podmínek (zejména řezné rychlosti) a následně produktivity o 50 až 100 %.[2]

#### **1.3.2.1 Diamantové povlaky**

Jak připájené roubíky, tak diamantové povlaky jsou většinou aplikovány na podkladový slinutý karbid. Zaručuje jim pevnost a odolnost proti tepelným a mechanickým šokům. Výhodou povlaků je větší rozsah výroby, nižší výrobní cena, pružná změna a větší složitost tvaru (např. utvářeč). Nejčastěji užívaným plynem je  $\text{CH}_4$  (methan). Diamantový povlak má velmi malý součinitel tření. Nižší součinitel tření povlakové vrstvy se projeví ve zvýšení řezného výkonu nástroje. Jeho tepelná vodivost je několikrát vyšší než tepelná vodivost mědi. Rychlost růstu vrstvy PKD (polykrystalický diamant) se pohybuje kolem hodnoty  $1 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ . [16]

Velikost diamantového zrna se pohybuje od 30 do 700  $\mu\text{m}$ . Efektivnost práce diamantových nástrojů závisí jednak na správné volbě druhu diamantu a jeho zrnitosti, jednak na správné výšce zakotvení diamantových zrn. Nesprávná volba některého z uvedených

parametrů může způsobit, že diamantový nástroj může mít několikanásobně vyšší opotřebení a v některých případech nemá funkční schopnosti pro danou operaci.[5]

Kromě výše uvedených specifík kompozitních materiálů, je při volbě řezného nástroje a při navrhování řezných podmínek třeba zohlednit další zvláštnosti těchto materiálů:[5]

- Směrová orientaci vyztužujících vláken vykazuje rozdílné mechanické vlastnosti.
- Kompozity mají nízkou tepelnou odolnost, při vyšších teplotách (100 - 300 °C) nejsou stálé.
- Několikanásobná tepelná roztažnost proti kovovým materiálům.
- Proces tvoření třísky v daleko větší míře ovlivňuje integritu obrobené plochy.
- Při obrábění vyztužených kompozitů se tvoří drobné částičky třísky, které je potřeba odvádět z místa řezu.
- Vzhledem k nasákavosti kompozitů nelze při jejich obrábění většinou aplikovat obvyklé procesní kapaliny.
- Hodnoty koeficientu tření mezi obráběným kompozitním materiálem a hřbetem nástroje, nebo třískou a čelem nástroje (0,15 - 0,30) jsou pro všechny nejužívanější nástrojové materiály (SK nebo diamant) nižší než při obrábění kovových materiálů.
- Hodnoty měrných řezných sil jsou mnohem nižší, než při obrábění kovů - tím se snižují řezné síly a potřebný příkon obráběcího stroje.

## **1.4 Analýza a prověření možností optimální výroby**

Nalezení optimálního řešení se týká konkrétního problému. Za optimální pokládáme takové hodnoty řešení problému, které za daných podmínek vedou k maximální či minimální hodnotě zadaného kritéria [17]. Optimalizované veličiny nejsou pevně dány a mohou se pohybovat v určitém rozsahu.

Optimalizaci je možné řešit třemi způsoby:

- solidním logickým rozbořem,
- zkusmo, intuitivně na základě zkušenosti,
- aplikací matematických metod.

## Prověření možností zkrácení výrobního taktu

Výběrem trvanlivějšího nástroje, snížením jednotkového strojního času  $t_{AS}$ . Poklesnou tak náklady na strojní práci  $N_s$ , což se promítne do výrobních nákladů na zhotovení jednoho kusu  $N_c$ . Nejčastěji lze dosáhnout tohoto výsledku zvýšením řezné rychlosti  $v_c$ , nebo zvýšením posuvu na otáčku  $f_n$  v dovolených možnostech ke kvalitě obrobenej plochy obrobku.

### 1.4.1 Trvanlivost břitu nástroje

Teorie trvanlivosti břitu nástroje je odvozena od obrábění kovu a analogicky lze trvanlivost nástroje uplatnit na obrábění kompozitu. Trvanlivost je dána opotřebením břitu. Při zvyšování posuvu na otáčku  $f_n$ , je nutné zkontrolovat drsnost povrchu **Rz**. Zvýšením posuvu na otáčku dojde ke zvětšení drsnosti a zároveň ke snížení trvanlivosti. Podle výkresové dokumentace je možné zjistit jaká je předepsaná drsnost a zda je možné zvyšovat posuv na otáčku  $f_n$ . Snížením trvanlivosti se zvýší náklady na výrobu jednoho kusu  $N_c$ . Záleží, co je pro výrobce důležitější, vyrobit více i za cenu zvýšení nákladů nebo úspora nákladů. Na řezné rychlosti je závislá trvanlivost břitu nástroje. Trvanlivosti břitu nástroje je dosaženo tehdy, není-li břit již schopen plnit stanovené úkoly. Při stanovení kritérií trvanlivosti břitu nástroje, je důležité vědět, že se jedná o hrubovací obrábění a nástroj byl vyměněn dříve, než dojde ke vzniku nekvalitního obrábění.[2]

Trvanlivost nástroje při frézování závisí na vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, hloubka řezu, řezné prostředí). Frederick Winslow Taylor definoval, že z řezných podmínek má na trvanlivost nástroje největší vliv právě řezná rychlost a odvodil základní vztah pro vzájemnou závislost těchto dvou veličin, který je znám pod názvem "**T-v<sub>c</sub>** závislost"[9].

$$T = \frac{c_T}{v_c^m} \quad [\text{min}] \quad (1.4)$$

$$v_c = \frac{c_v}{T^{1/m}} \quad [\text{m/min}] \quad (1.5)$$

Kde:

- $v_c$  [m/min] je řezná rychlost,
- $T$  [min] je trvanlivost nástroje,
- $m$  [-] je materiálová konstanta,

- $C_v [-]$  je konstanta (řádově  $10^2$  až  $10^3$ ),
- $C_T [-]$  je konstanta s vysokou hodnotou (řádově  $10^8$  až  $10^{12}$ ).

Nevýhodou uvedených základních vztahů  $T-v_c$  závislosti je omezení následujícími podmínkami:

- hloubka řezu  $a_p = \text{konst.}$ ,
- posuv na otáčku  $f_n = \text{konst.}$ ,
- opotřebení  $VB = \text{konst.}$

Při provádění optimalizací, nejprve optimalizujeme kvalitu. To znamená, aby obrobený povrch plnil správně svoji funkci a drsnost  $R_z$  na ploše povrchu odpovídala zadaným parametrům. Po zajištění kvality, je žádoucí provést optimalizace na zkrácení výrobního taktu. Pokud by byl nejprve zkrácen výrobní takt a pak až jakost, je velká pravděpodobnost vzniku neefektivní optimalizace. Při optimalizacích na zvýšení kvality je častým jevem zvýšení výrobního taktu, proto je důležité zvolit správný postup při optimalizaci.

## 1.4.2 Optimální trvanlivost břítu nástroje

Trvanlivost břítu nástroje obecně závisí na řezných podmínkách. Určení konkrétní hodnoty trvanlivosti se provede pro výchozí podmínky, které se specifikují jako minimální náklady na obrobení dané plochy nebo maximální výrobnost za jednotku času.[19]

### 1.4.2.1 Kritérium minimálních výrobních nákladů

Celkové operační výrobní náklady  $N_c$  se vyjádří jako součet dílčích složek:[19]

$$N_c = N_s + N_v + N_{nv} \text{ [ Kč ]} \quad (1.6)$$

- $N_s$  - náklady na strojní práci [ Kč ]
- $N_v$  - náklady na vedlejší práci [ Kč ]
- $N_{nv}$  - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden kus [ Kč ]

Náklady na strojní práci souvisí s jednotkovým strojním časem, potřebným pro obrobení jednoho kusu obrobku:

$$N_s = t_{AS} \cdot N_{sm} \quad [\text{Kč}] \quad (1.7)$$

- $t_{AS}$  - jednotkový strojní čas [ min ]
- $N_{sm}$  - náklady na minutu strojní práce [ Kč ]

Jednotkový strojní čas  $t_{AS}$  je čas automatického chodu obráběcího stroje. Při obrobení dané součásti je pro většinu obráběcích metod definován obecným vztahem:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \quad [\text{min}] \quad (1.8)$$

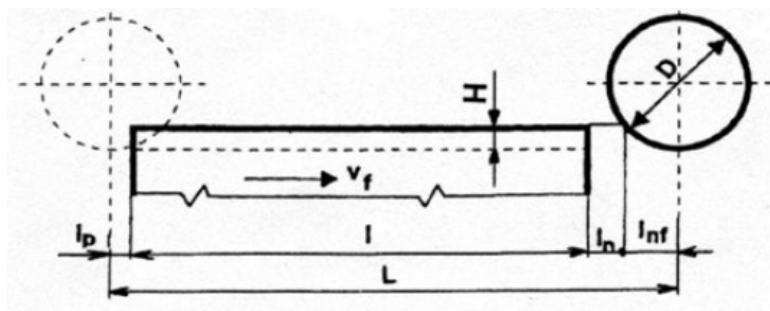
- $L$  - dráha nástroje ve směru posuvu [ mm ]
- $v_f$  - posuvová rychlost [m/min]

Hodnoty  $L$  se stanoví pro válcové frézování – obr. 1.17.

$$L = l + l_n + l_p + l_{nf} \quad (1.9)$$

$$l_{nf} = \sqrt{H(D - H)} \quad (1.10)$$

Hodnoty jednotkového strojního času pro základní případy frézování se vyjádří na základě poměrů naznačených na obr. 1.17.



Obrázek 1.17 dráha frézy válcového frézování [19]

Kde:

$d$  – průměr frézy [mm],  $H$  – hloubka odebírané vrstvy [mm],  $L$  – dráha frézy ve směru posuvu [mm],  $l$  – délka frézované plochy [mm],  $l_n$  – délka náběhu [mm],  $l_{nf}$  – délka náběhu frézy [mm],  $l_p$  – délka přeběhu [mm],  $v_f$  – posuvová rychlost [mm/min]

### 1.4.2.2 Kritérium maximální výrobnosti

Maximální výrobnost koresponduje s minimální hodnotou operačního času jednotkové práce, který se v daném případě vyjádří jako součet základních složek:[19]

$$t_A = t_{AS} + t_{AV} + t_{AX}/Q_T \quad [ \text{min} ] \quad (1.11)$$

**kde:**

$t_A$  - operační čas jednotkové práce [min],  $t_{AS}$  - jednotkový strojní čas [min],  $t_{AV}$  - jednotkový vedlejší čas [min],  $t_{AX}$  - čas jednotkové nepravidelné obsluhy [min],  $Q_T$  - počet kusů obrobených za jednu trvanlivost nástroje [-]

## 1.5 Upínání kompozitních dílců

### Upínání kompozitového polotovaru pomocí podtlakového (vakuového) systému.

Při vakuovém upínání se vytváří podtlak pod upínacím obrobkem. Vzniká tlakový rozdíl mezi obrobkem a upínací deskou. Tím je obrobek přitlačován na vakuový stůl. Posuvná síla obrobku je přímo závislá na drsnosti povrchu obrobku, tlakovému rozdílu a odsávané ploše. Čím je větší odsávaná plocha, tím je výhodnější přídržná síla.

Předností vakuového systému je upínání obrobků různých železných, dřevěných a umělých ploch s manipulační jednoduchostí. Polotovar je přitlačován přes těsnící gumu, která vyrovnává nerovnosti povrchu obrobku. Drážky desky se přizpůsobí potřebnému tvaru obrobku pro frézování válcové a vrtání děr. Zvyšuje se tím produktivita, hospodárnost a navíc nevzniká žádné poškození při upínání obrobku. Další předností je plynulé a rychlé přizpůsobení na jiný rozměr. Podtlakový systém upínání umožňuje rychlou a jednoduchou manipulaci různých velikostí a rozměrů obrobků. Z toho vyplývá zkrácení přípravného času.

### Upínání kompozitového polotovaru pomocí upínek kopírujících tvar polotovaru.

U obrábění nastává problém při potřebném vyložení polotovaru. Oddělením materiálu tenkých rozměrů dochází k vibracím, které mají negativní vliv na povrch obrobku. Může dojít až k nevratnému poškození obrobku i nástroje. Složité obráběné tvary mají podle směru vláken orientovanou pevnost (menší ve směru vláken), která má vliv na průběh obrábění.

## 2 Charakteristika druhů vad a jejich příčiny

Při obrábění kompozitu mohou nastat následující vady:

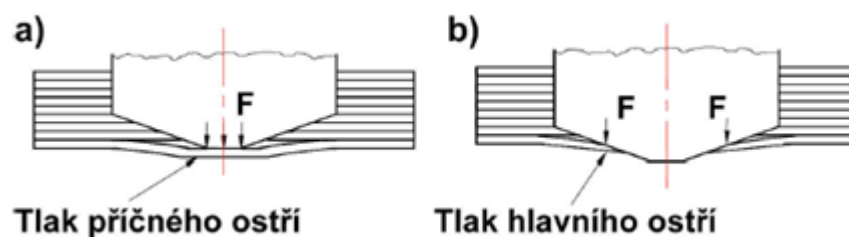
- delaminace,
- nedoříznutá vlákna,
- přehřívání nad 150°C.

### 2.1 Delaminace

Při obrábění kompozitů dochází v jejich povrchové vrstvě k mnoha poškozením, která jsou svým vzhledem, mechanismy vzniku a porušováním jiná než u kovových materiálů. Nejčastějším typem poškození je delaminace, může k ní docházet jak při vstupu (odlupování povrchové vrstvy), tak i výstupu (odlupování neobrobené vrstvy pod nástrojem) nástroje z materiálu.

Charakteristika delaminaci je ilustračně vysvětlena na technologii vrtání. Analogicky ji lze použít pro frézování, které bude řešeno v praktické části. Technologie delaminace pro frézování doposud nebyla publikována. Vznik a rozvoj delaminace probíhá postupně ve dvou fázích. Fáze působení *příčného ostří* a fáze působení *hlavního ostří*. První fáze začíná v momentě, kdy tlaková síla od příčného ostří na dosud neobrobenou vrstvu materiálu dosáhne kritické hodnoty a končí poté, co příčné ostří pronikne ven. Při deformaci se nejdříve vytvoří malé vydutí a poté se dále šíří ve směru vláken v povrchové vrstvě (obr. 2.1a). V okamžiku, kdy vydutí dosáhne mezní hodnoty, povrchová vrstva se rozevře, příčné ostří pronikne ven a následně začne druhá fáze. Delaminace iniciovaná v první fázi se v důsledku tlaku a otáčení hlavního ostří dále rozvíjí (obr. 2.1b). Příčné ostří řeže materiál obrobku s velkým negativním úhlem a tvoří přes 50 % posuvové síly (tím sehrává klíčovou roli při procesu). V momentě kdy příčné ostří prostoupí na povrch, delaminace dosáhne z velké části své konečné velikosti.[3]



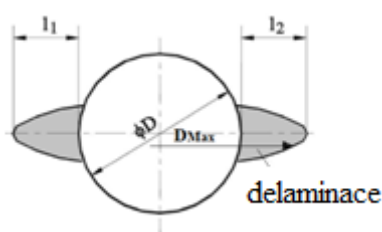


Obrázek 2.1 fáze vzniku delaminace [3]

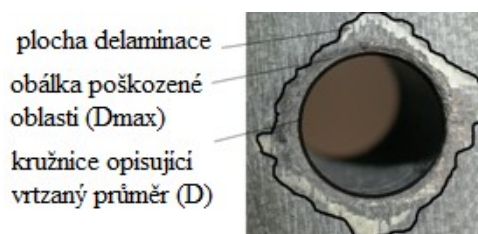
### 2.1.1 Určení množství delaminace

Pro každou skupinu kompozitních materiálů je nutno nejprve definovat veličinu charakterizující delaminaci, tzv. delaminační faktor  $F_d$ . U **vícesměrně** vyztužených materiálů nebo kompozitů s povrchovou rohoží vzniká delaminace po celém obvodu otvoru tak, jak je uvedeno na obr. 2.3. V takovém případě je možno vyjádřit delaminační faktor  $F_d$  jako poměr maximálního průměru delaminované oblasti  $D_{Max}$  a průměru nástroje  $D$ . [1]

$$F_d = \frac{D_{Max}}{D} \quad (2.1)$$



Obrázek 2.2 maximální průměru oblasti [1]



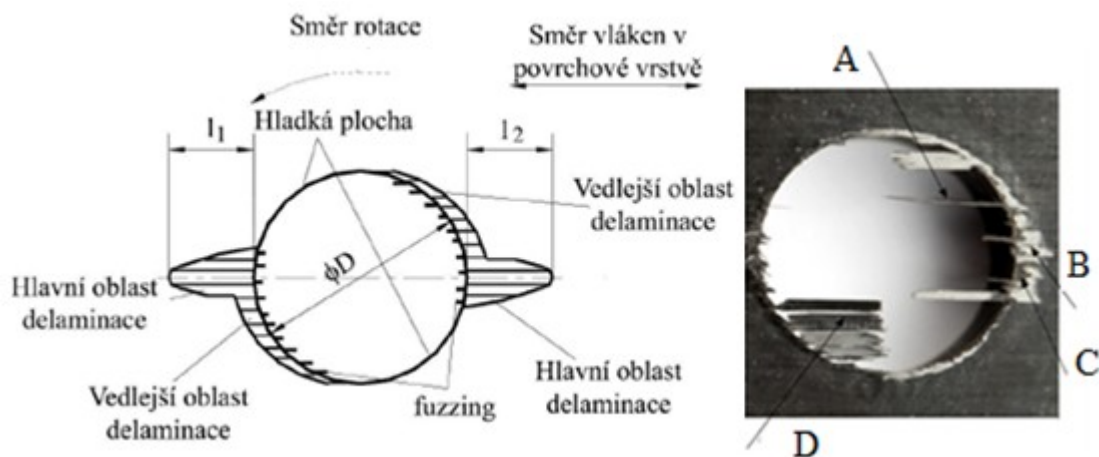
Obrázek 2.3 plocha delaminace

U **jednosměrně** vyztužených kompozitů se delaminace šíří výhradně ve směru os vyztužujících vláken a je charakteristická svou hlavní a vedlejší oblastí viz obr. 2.4. Stejně jako u víceměrných kompozitů se na okrajích děr navíc často vyskytuje i malé množství nedokonale obrobených vyztužujících vláken. Tento nepříjemný jev, z angličtiny zvaný fuzzing (fuzz = chmýří, chlupy), je způsoben především následujícími příčinami: [1]

- Vlákná nejsou čistě řezána v oblasti, kde je ostrý úhel mezi směrem vláken a vektorem řezné rychlosti.
- V povrchové vrstvě nejsou vlákna plně vystavena (podrobena) stříhové deformaci. [5]

Delaminační faktor  $F_d$  lze pro jednosměrné kompozity stanovit na základě aritmetického průměru délek  $l_1$  a  $l_2$ .

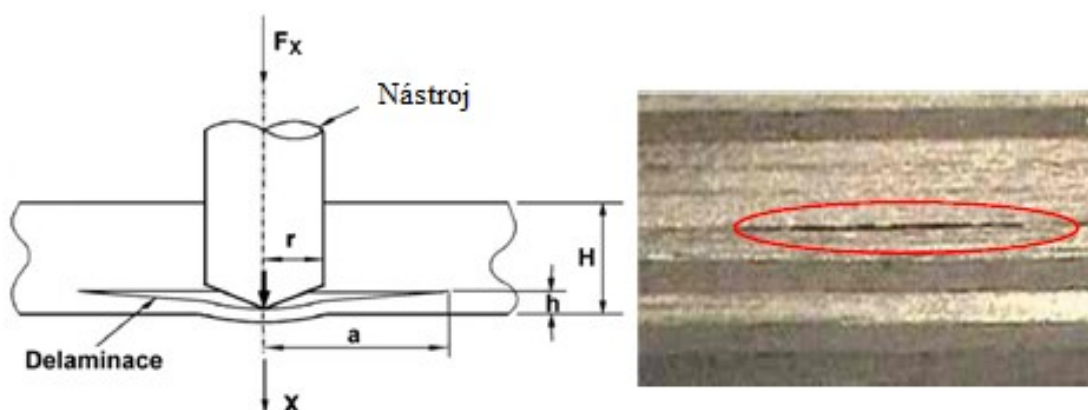
$$F_d = \frac{(l_1 + l_2)}{2} \quad (2.2)$$



Obrázek 2.4 jednosměrně vyztužený kompozit[1]

- A – nedoříznuté vlákno
- B – delaminace
- C – odloupnutá část
- D – nedoříznutá pryskyřice

Delaminace u kompozitních materiálů jejichž požadovaná tloušťka je budována postupně z vrstev (tzv. lamináty) nenastane uvnitř vrstvy, ale pouze mezi jednotlivými vrstvami laminátu.[11]



Obrázek 2.5 delaminace u vrstveného kompozitu [11]

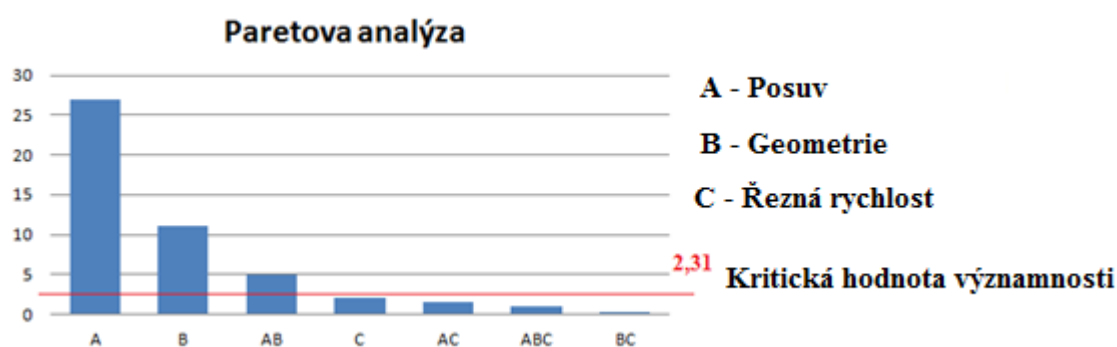
Jak již bylo zmíněno dříve, problematika delaminace kompozitních materiálů nemůže být spojována pouze s výstupem nástroje, ale vyžaduje taktéž samostatné posouzení při jeho vstupu. V důsledku vnikání otáčejícího se břitů nástroje do povrchové vrstvy kompozitu. Síla může následně oddělit horní vrstvu kompozitního materiálu. Síla způsobující delaminaci je závislá především na geometrii nástroje a dále na tření mezi nástrojem a obrobkem. Z geometrie sehraává hlavní roli úhel čela, jehož velikost je dána stoupáním šroubovice.[1]

### 2.1.2 Vliv řezných podmínek na delaminaci

Na základě cíleně prováděných změn vstupních faktorů procesu byl vyhodnocen vliv řezných podmínek. Odezvou byla velikost delaminace  $F_d$ . Výsledek je patrný z grafu Paretové analýzy.[5]

Vstupní faktory: **A** - posuv, **B** – geometrie řezného nástroje a **C** – řezná rychlost.

**Graf 1: Paretova analýza [5]**



Největší vliv má posuv, dále geometrie nástroje a odezva těchto dvou faktorů.

#### Posuv a geometrie

Nejvíce ovlivňují tvorbu delaminace posuv a geometrie nástroje (délka příčného ostří). Delaminace povrchových vrstev kompozitu je velmi vysoká. U nástroje bez úpravy (podbrus) příčného ostří dochází ke zvýšení posuvové síly. Hlavní vliv na poškození oblasti kolem obráběné díry má příčné ostří nástroje. U nástrojů s výraznými rovinnými podbrusy hřbetní plochy, čímž je odstraněno příčné ostří, je očekávána nejvyšší kvalita (nejmenší poškození) v okolí díry. Z toho plyne přímá úměra, čím vyšší posuvová síla, tím větší poškozená oblast v okolí výstupu.[5]

## 2.2 Nepřeříznutá vlákna

Vznikají ve větší míře při nesousledném frézování. Vlivem ohýbáním vláken přes hřbet opotřebovaného nástroje, kde už geometrie nástroje neplní požadovanou funkci. Vlákná jsou tak částečně vytahována z matrice a následně jsou odlomená. Vada je viditelná pouhým okem, kdy vlákna ční ven z hrany obrobeneho povrchu. Četnost a délka je ovlivněna stupněm opotřebení nástroje. Nepřeříznutá vlákna znázorněna na obr. 3.6 se tvoří více na horní nebo spodní hraně obráběného kompozitu v závislosti na stoupání šroubovice nástroje. Šroubovice může být tažná nebo tlačná. To znamená, že tažná šroubovice tvoří více nedoříznutých vláken na horní straně obráběného kompozitu a naopak. Dále se tvoří v místech, kde nástroj opouští materiál. Zde dojde k zeslabení odřezávané plochy materiálu a vlivem deformace se vyhrne.



Obrázek 2.6 nedoříznuté vlákno[11]

## 2.3 Vliv tepla na kompozit

Špatný odvod vzniklého tepla zalepuje funkční plochy řezného nástroje zejména na jeho čele. Proto je nutné volit takové řezné podmínky, aby nebyla překročena kritická teplota. Při vysoké teplotě dochází k degradaci pryskyřičné matrice a na obroběném povrchu se začnou objevovat natavené či spálené oblasti. Dále pojivo ztrácí funkci ochrany výztuže před poškozením a nepřenáší napětí do výztuže, které působí na materiál.

Není moc možností chlazení řezného procesu. Procesní kapaliny se nepoužívají pro nasákavost kompozitů. Teplotu tedy převážně ovlivňujeme geometrií nástroje, počtem břitů v řezu a mimo řez, materiálem nástroje, řeznou rychlostí, posuvem a vzduchovým chlazením. Geometrie nástroje by měla mít dostatečně velkou zubovou mezeru pro odřezávané třísky a jejich odstranění z místa řezu, aby nedocházelo ke zpětnému nalepení. A dále provádět čistý řez (nelámání uhlíkových vláken o hřbet nástroje), který netvoří velké množství tepla.

Velikosti řezných a posuvových rychlostí limitující vznik kritické teploty při obrábění za daných technologických podmínek nejsou jasně definovány. Záleží na zkušenostech a poznatcích technologa a obsluhy stroje, jelikož teplota je ovlivňována mnoha faktory (například stav nástroje, velikosti posuvu, rychlostí). Několikanásobná tepelná roztažnost proti kovovým materiálům musí být brána na zřetel jak při samotné volbě technologických podmínek obrábění, tak i při následné kontrole rozměrů a tvarové přesnosti.

### **2.3.1 Teplota v místě řezu**

Při obrábění je značná část (až 98 %) veškeré mechanické energie přeměněna na tepelnou energii. Vzhledem k nízké tepelné vodivosti obráběných materiálů přestupuje vzniklé teplo do obráběného materiálu a do třísky pouze v malém rozsahu. Zbytek tepla je tedy odváděn nástrojem, což jej nadměrně tepelně zatěžuje a výrazně zvyšuje intenzitu opotřebení. Je-li to možné vzhledem k povaze obráběného materiálu, je vhodné použít při obrábění procesního chlazení (vzduchu nebo kapalin). Ty chladí nástroj a odvádí část vzniklého tepla v místě řezu.[1] Současně odvádějí z místa řezu třísky a prach, které mají z teplotního hlediska nepříznivé vlastnosti na materiál vlivem jeho hromadění.

## **2.4 Kontrola kvality kompozitových materiálů**

Nutnost zjištění poškození kompozitního materiálu s sebou v praxi nese požadavek nedestruktivního zkoušení. *„Objevuje se tedy potřeba spolehlivé, dostatečně citlivé, rychlé, nenáročné metody nedestruktivního zkoušení, schopné poškození detekovat, lokalizovat a co nejpřesněji kvantifikovat tak, aby bylo možné rozhodnout o nutnosti opravy.“* Žádná z metod či technik neodhalí vše. Platí to v absolutní míře právě pro kompozitní materiály. *„Vlákněný a vrstevnatý charakter kompozitů v kombinaci se způsobem jejich výroby si pro dokonalou prohlídku celistvosti přímo vynucuje použití kombinace více metod.“*[13]

V současnosti je patrný nejen trend k adaptaci metod klasických (rentgenová radiografie užívající elektronických detektorů, laserová ultrazvuková metoda apod.), ale také snaha o vývoj metod zcela nových (holografické metody, infračervené termografické metody apod.). Používá se také počítačové fúze dat ze senzorů pracujících na různých fyzikálních principech.

Nebo i užití speciálních skenovacích zařízení ve spojení s počítačovou podporou vyhodnocování obrazových dat.[13]

### **Nedestruktivní zkouška ultrazvukem**

Ultrazvuková metoda využívá zvukové energie procházející skrz zkoušený díl za účelem odhalení vad. Jedná se o zvukové vlny o frekvenci nad mezí slyšitelnosti. Ultrazvukové zkoušení zahrnuje dvě základní metody. První je založená na zeslabení ultrazvuku při průchodu místem s materiálovou vadou. To je tzv. průchodová metoda. Velkou výhodou této metody je fakt, že ultrazvuk přechází poloviční dráhu, tedy se méně zeslabuje. Druhá metoda je založená na zjišťování odrazů, které jsou způsobené vadami materiálu tzv. odrazová metoda. Nevýhodou je, že ultrazvuk překonává dvojnásobnou dráhu, než je vzdálenost k vadě a dále tzv. mrtvého pásma omezujícího zjišťování vad pod zkušebním povrchem. Ultrazvukové zkoušení lze uplatnit na kontrolu delaminací v materiálu.

Výhody: citlivá zkouška pro malé vady; výsledek je okamžitý.

Nevýhody: povrch musí být pro zkoušení přístupný; drsné povrchy brání zkoušení.

### **Nedestruktivní zkouška prozařováním**

Prozařování odhaluje vady pod povrchem zkoumané součásti. Je účinnější na vady, které nejsou plošné na rozdíl od ultrazvuku, který je spíše vhodný na plošné vady.

Výhody: schopnost kontrolovat vnitřní i vnější vady.

Nevýhody: bezpečnostní riziko, velmi drahé.

### **Nedestruktivní zkouška vizuální metodou**

Vizuální metoda je nejstarší a nejběžnější formou nedestruktivní kontroly v letectví. Přibližně 80% všech kontrol jsou provedeny přímou vizuální metodou. Tuto metodu lze značně rozšířit použitím vhodných kombinací lup, průmyslových endoskopů a zdrojů světla.

Vizuální kontrolu lze rozdělit do dvou základních skupin:

- Přímou – kontrola, při které není přerušena optická dráha mezi okem operátora a kontrolovanou plochou.
- Nepřímou – kontrola, při které je optická dráha přerušena.

Výhody: Nenákladná, Minimální příprava dílu. Nevýhody: Odhalí pouze povrchové vady.

## Nedestruktivní zkouška pomocí infračervené termografie

Infračervená (IR) termografie se usadila jako široce využitelná metoda nedestruktivní kontroly. „*V letectví ji lze obecně užít při lokalizaci povrchových defektů, měření tloušťky nátěrů a povlaků, zjišťování stavu nýtových spojů, kontroly speciálního elektrického vybavení a podobně.*“ V případě kompozitových potahových panelů se zdá mít značný potenciál v odhalování povrchových i podpovrchových vad a poškození. [13]

Termografické techniky lze rozdělit dle principu na pasivní a aktivní:

**Pasivní IR termografie** se používá u zkoumaných materiálů, které mají přirozeně odlišnou teplotu od okolního prostředí.

Využití **Aktivní IR termografie** je podmíněno vnějším energetickým stimulem, nutným k zobrazení tepelného kontrastu zkoumaného materiálu. Aktivní techniky jsou vhodné pro nedestruktivní zkoušení kompozitových materiálů. Mezi aktivní techniky lze zařadit pulzní termografii, techniku postupného ohřevu, synchronizovanou termografii (tzv. locking thermography), ultrazvukovou termografii a vibrotermografii.[13]

Aktivní IR termografie:

některé výhody:

- široké pole využití; relativně vysoká citlivost; bezkontaktní charakter; možnost rychlé kontroly relativně velkých ploch.

Nevýhody:

- obtížně dosažitelnou uniformitu ohřevu; nebezpečí vzniku efektu tepelných ztrát (konvekčních a radiačních), což může vést k falešným indikacím; problémy s emisivitou (v některých případech je nutné černění povrchu).

Defekty, jakými může být například delaminace, odlepení, roztržená vlákna a podobně, ovlivňují tepelné vlastnosti materiálu. Při aplikaci vnějšího energetického stimulu se projeví vada změnou teplotního rozložení. Zachycené radiometrické hodnoty IR kamerou lze přímo transformovat na hodnoty teploty. „*Základem pro zvýšení citlivosti a rozlišovací schopnosti termografických technik či odstranění vlivu nehomogenity ohřevu a změn v odrazivosti povrchu je následné počítačové zpracování dat, získaných ve formě statického termogramu nebo videa, pomocí IR kamery*“. Poměrně časté je zobrazování termogramu ve fázové doméně, místo běžné domény časové. [13]

### 3 Návrh technologie obrábění

Na praktické části bylo spolupracováno s podnikem LETOV LETECKÁ VÝROBA s.r.o., kde probíhal výzkum obrábění kompozitních materiálů s cílem zefektivnit výrobu současného stavu obrábění.

#### 3.1 Stávající technologie obrábění:

- Díl z reaktoplastu o frézované dráze  $L$  9300 mm je podtlakově připevněn na formu a nástrojem Walter  $\varnothing d$  10 mm je obvodově frézován za stávajících technologických podmínek.

Tab. 4: Stávající technologie reaktoplast.

Obrázek 3.1 díl z reaktoplastu

Obrázek 3.2 nástroj Walter s diamantovým povlakem

|            |                            |   |                                 |                     |                                   |                                    |
|------------|----------------------------|---|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| nástroj    | typ: 3D1167G88360700       |   |                                 |                     |                                   |                                    |
| počet zubů | hloubka řezu $a_p$<br>[mm] | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje<br>[mm] | řezná rychlost $v_c$<br>[m/min] | posuv $f_n$<br>[mm] | velikost posuvu $v_f$<br>[mm/min] | otáčky $n$<br>[min <sup>-1</sup> ] |
| 7          | 3,2                        | 10 x 25   | 148                             | 0,19                | 890                               | 4711                               |

- Díl z termoplastu o frézované délce  $L = 3100$  mm je upínkami připevněn na přípravek a nástrojem od firmy Thomas  $\varnothing d$  8 mm je obvodově frézován za stávajících technologických podmínek. Jeden nástroj vydrží obrobit šest dílů z termoplastu = 18 600 mm.



**Tab. 5: Stávající technologie termoplastu.**

Obrázek 3.3 díl z termoplastu

Obrázek 3.4 nástroj Thomas FKE C s povlakem TIN.

|            |   |  |                              |                  |                                |                                  |
|------------|---|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| nástroj    | typ: FKE ref. Číslo 4909831 povlak TIN. |  |                              |                  |                                |                                  |
| počet zubů | hloubka řezu $a_p$ [mm]                 | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 2          | 4,5                                     | 8 x 35 x 80  | 250                          | 0,1              | 500                            | 10 000                           |

### 3.2 Návrh obráběcích testů:

Účelem testů je zlepšení současné technologie na základě porovnání stávajících frézovacích nástrojů a technologie s možnostmi jiných nástrojů a technologie. Pro porovnání a věrohodnost výsledné kvality jsou zvoleny nástroje od společností Walter-tools a Secotools. Tyto firmy mají svou nástrojovou nabídku pro obrábění kompozitních materiálů. Test frézování zaměřený na trvanlivost a vzniklý povrch nástroje probíhá ve vzorcích skládaného čtyřvrstvého materiálu z uhlíkového kompozitu.

Při návrhu nové technologie byl použit stejný stroj, upínač a obráběný materiál.

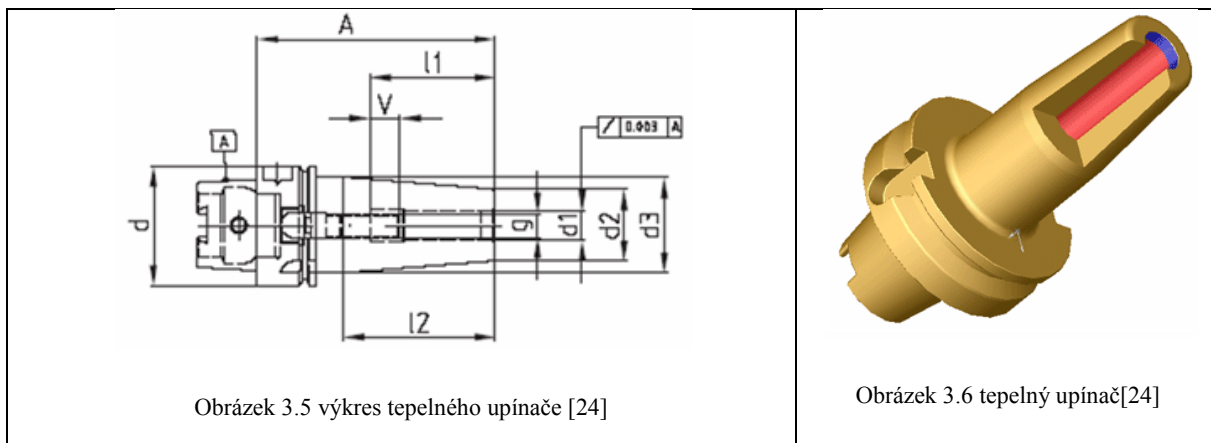
#### Obráběcí stroj:

Obrábění kompozitu se provádí na pětiosé portálové fríze JOBS typ LINX COMPACT o maximálních otáčkách  $n$  24000 min a posuvu  $v_f$  6000 mm · min<sup>-1</sup>. Do vřetena typu T2D se upíná tepelný upínač typu HSK – 63 – A s vyloženým nástrojem přibližně 40 mm. Podrobný popis stroje s obrázkem viz **příloha 8**. [26]

#### Tepelný upínač:[24]

**Tab. 6: Tepelně smršťovací upínač HSK 63 tvar A DIN 69893.**

| SK Ø d | d1 | d2 | d3 | L1 | L2 | A  | V  | g    |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|------|
| 40     | 8  | 20 | 27 | 36 | 45 | 90 | 10 | M6   |
| 40     | 10 | 24 | 32 | 42 | 50 | 90 | 10 | M8x1 |



Kde: d,g – průměr upínače [mm]; L,A, V- délka [mm]

#### Materiál vzorku z reaktoplastu a termoplastu:

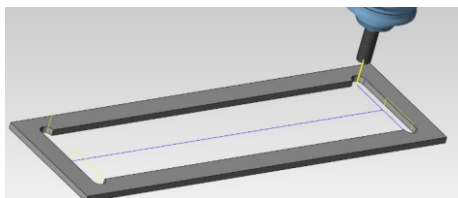
Obráběný materiál *reaktoplast* se skládá z výztuže uhlíkových vláken a epoxidové matrice, jak je popsáno v teoretické části. Při výrobě se do materiálu dále přidávají bronzová vlákna, která se standardně nepoužívají. Je to speciální aplikace, pro vytvoření *Faradayovy klece* na povrchu letadla. Obráběný materiál *termoplastu* se skládá z výztuže uhlíkových vláken a PPS (polyfenylsulfidické) matrice. Vyrábí se tak rámy (výztuhy) i náběžné části křidel osobních letadel Boeing. Maximální teplota použití PPS vyztuženého termoplastu je do 240 °C. Materiál i proces obrábění je ekologičtější (menší prašnost). Nevýhodou materiálu je obtížná optimalizace struktury, vnitřní pnutí a omezení při výrobě složitějších tvarů.

### 3.2.1 Princip testu

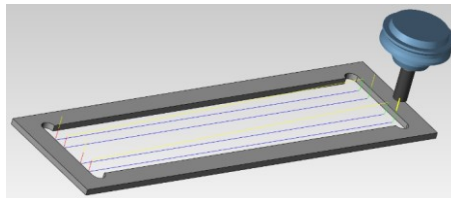
#### **Reaktoplast – Potah**

Pro testy je použit odpadový materiál (vzorek) o velikosti 400 x 90 x 3,2 mm reaktoplastu z hotového výrobku. Tento testovaný materiál má stejné vlastnostmi jako skutečný výrobek. Vzorek je upnut v přípravku, ve kterém se koná test obrábění. Do vzorku je vrtán průchozí otvor, který slouží pro najetí frézy. Netestovaný nástroj frézuje drážku tvaru *I* z technologických důvodů. Pravoúhlé průchozí drážky testu se frézují po přímce, aby byl zajištěn konstantní průběh vstupujících parametrů. Testují se nástroje monolitní stopkové frézy o průměru 10 mm s nulovým vyložení. To znamená jejich plným záběrem 10 mm v materiálu, který je přesazen v ose z minimálně 2 mm pod materiál. Obrábí se za stálého

chlazení vzduchem a odsávání třískového prachu. Délka obrobené dráhy ve vzorku je 1440 mm. Frézování ve vzorcích trvá až do doby opotřebení nástroje zjištěného solidním logickým rozbořem na základě obrobeného povrchu. To může být doba úplného opotřebení nástroje, kdy už obrobený povrch neodpovídá požadovaným vlastnostem. Cílem je výběr optimálních řezných podmínek a hodnocení trvanlivosti nástroje.



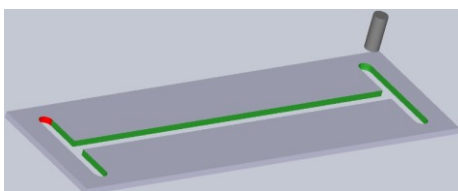
Obrázek 3.7 drážka předfrézované drážky



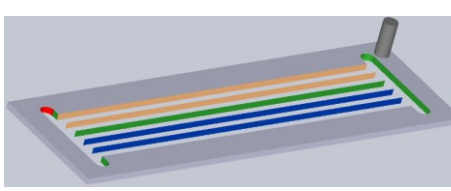
Obrázek 3.8 technologické dráhy nástroje

### Termoplast – RTL díl

Pro testy je použit odpadový materiál (vzorek) o velikosti 400 x 90 x 4,5 mm termoplastu z hotového výrobku. Tento testovaný materiál má stejné vlastnostmi jako skutečný výrobek. Vzorek je upnut v přípravku, ve kterém se koná test obrábění. Do vzorku je vrtán průchozí otvor, který slouží pro njetí frézy. Netestovaný nástroj frézuje drážku tvaru *I* z technologických důvodů. Pravoúhlé průchozí drážky testu se frézují po přímce, aby byl zajištěn konstantní průběh vstupujících parametrů. Testují se nástroje monolitní stopkové frézy o průměru 8 mm s nulovým vyložením. To znamená jejich plným záběrem 8 mm v materiálu, který je přesazen v ose z minimálně 2 mm pod materiál. Obrábí se za stálého chlazení vzduchem a odsávání třískového prachu. Délka obrobené dráhy ve vzorku je 2100 mm. Frézování ve vzorcích trvá do doby určení nejvhodnějších řezných parametrů na základě obrobeného povrchu. Cílem testu je vyhodnocení řezných podmínek nástroje a následné určení vhodnosti nástroje pro obrábění kompozitu či nikoli.



Obrázek 3.9 model předfrézovaná drážka




Obrázek 3.10 model technologické dráhy nástroje

### 3.2.2 Testy v materiálu reaktoplast

**Test 1:** Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo zkušební odladění otáček nástrojem od firmy Walter-tools o  $\varnothing$  d 10 mm. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm, který frézoval proti směru posuvu k hodnocenému obrobenému povrchu s přesahem v ose z 3 mm pod materiálem bez chlazení a s odsáváním třísek. Volba řezných podmínek byla stanovena za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Walter-tools.

**Tab. 7: Parametry pokusů nástroje testu číslo 1.**

|  |            |                             |  |                              |                  |                                |                                  |
|--|------------|-----------------------------|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
|  |            |                             |  |                              |                  |                                |                                  |
| Obrázek 3.11 nástroj Walter s diamantovým povlakem                                 |            |                             |  |                              |                  |                                |                                  |
|  | nástroj    | typ: 3D1167G88360700        |  |                              |                  |                                |                                  |
| pokus  | počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm] | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 1  | 7          | 3,2                         | 10 x 25  | 148                          | 0,23             | 1083                           | 4711                             |
| 2  |            |                             |  | 148                          | 0,19             | 890                            | 4711                             |
| 3  |            |                             |  | 200                          | 0,19             | 1210                           | 6369                             |
| 4  |            |                             |  | 250                          | 0,19             | 1512                           | 7961                             |

Průběhu pokusu číslo 1 na základě volby řezné rychlosti a posuvu po 350 mm vykazoval vysoký nepříjemný zvuk. Řezný proces pokusu číslo 2 byl vyhovující, nástroj pracoval klidně a může být tento pokus označen za vhodně zvolené řezní podmínky. U pokusu 3 byl stále vyhovující zvuk obrábění, třísky už ale vykazovaly vyšší teplotu. Při pokusu 4 nastal nepříjemný jev - doutnající třísky.

#### Hodnocení:

Nejlépe z odzkoušených technologických podmínek se jeví pokus číslo 2. Jelikož byl tento test proveden za účasti techniků firmy Walter-tools až po testu 2 a 3, došlo k ověření vhodnosti volby technologických podmínek v testu 2 a 3. Volba technologických podmínek v testu 2 a 3 byla zvolena na základě vnitropodnikového souhrnného seřizovacího listu.

**Test č. 2.** Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo frézování nástrojem od firmy Walter-tools o  $\varnothing d$  10 mm. Test frézování se konal proti směru posuvu k hodnocenému obrobenému povrchu na základě řezných podmínek vnitropodnikového souhrnného seřizovacího listu, bez chlazení s odsáváním třísek. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm a frézoval s přesahem v ose z 2 mm pod materiál.

**Tab. 8: Parametry nástroje testu číslo 2.**

| nástroj                     | typ: 3D1167G88360700                               |            |                              |                  |                                |                                  |
|-----------------------------|--|------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm] | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | počet zubů | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 3,2                         | 10 x 25  | 7          | 148                          | 0,19             | 890                            | 4711                             |

#### Hodnocení testu číslo 2:

- Vliv geometrie nástroje způsobila z počátku vyšší tón při obrábění po dobu 1400 mm.
- Nedoříznutá vlákna se postupem obrábění tvořila na spodní straně obrobené plochy.
- Vlivem opotřebení nástroje délka vláken narůstala. To až do délky 2 mm, kdy byl tento test ukončen z kvalitativních důvodů obrobené plochy.

Délka nedoříznutých vláken byla rozhodujícím parametrem pro ukončení testu. Výsledná hodnota obrobené dráhy byla 9800 mm za dobu trvanlivosti 11 min. Celý průběh testu frézování, ve kterém je vidět průběh nedoříznutých vláken, je v **příloze 1**.

**Test č. 3.** Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo frézování nástrojem od firmy Walter-tools o  $\varnothing d$  10 mm. Test frézování se konal ve směru posuvu k hodnocenému obrobenému povrchu na základě řezných podmínek vnitropodnikového souhrnného seřizovacího listu, bez chlazení s odsáváním třísek. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm a frézoval s přesahem v ose z 2 mm pod materiál.

**Tab. 9: Parametry nástroje testu číslo 3.**

| nástroj                     | typ: 3D1167G88360700                               |            |                              |                  |                                |                                  |
|-----------------------------|--|------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm] | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | počet zubů | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 3,2                         | 10 x 25  | 7          | 148                          | 0,19             | 890                            | 4711                             |

### Hodnocení testu číslo 3:

- Geometrie nástroje způsobila z počátku vyšší tón při obrábění po dobu 1400 mm.
- Téměř nevznikají nedoříznutá vlákna, pouze řádově 0,3 mm.
- Vlivem stoupající teploty byl test ukončen (na horní ploše náznak tepelně ovlivněné oblasti).

Teplota vzorku byla rozhodujícím parametrem pro ukončení testu. Výsledná hodnota obrobené dráhy byla 7 000 mm, což je doba trvanlivosti nástroje v řezu 7 min a 48s. Celý průběh testu frézování, ve kterém je vidět průběh nedoříznutých vláken, je v **příloze 2**.

**Tab. 10: Výsledky testů 1 a 2 - porovnání obrobené dráhy.**

|                              | test 1 | test 2 |
|------------------------------|--------|--------|
| řezná rychlost $v_c$ [m/min] | 148    | 148    |
| posuv $f_n$ [mm]             | 0,19   | 0,19   |
| obrobená dráha L [mm]        | 9800   | 7000   |
| Čas $t_{AS}$ [min]           | 11     | 7, 8   |

Pozn.: Na základě výsledků délky obrobené dráhy jsou další testy prováděny proti směru posuvu k hodnocenému obrobenému povrchu.

**Test č. 4.** Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo frézování nástrojem od firmy Secotools o  $\varnothing$  d 10 mm. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm, který frézoval s přesahem v ose z 3 mm pod materiálem, bez chlazení a s odsáváním třísek. Řezné podmínky byly stanoveny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Secotools.

**Tab. 11: Parametry nástroje testu číslo 4.**

Obrázek 3.12 JC 871 Povlak DURA

test č. 4    test č. 5

Obrázek 3.13 použitý JC 871 Povlak DURA

| nástroj                        | typ: 871100.0 DURA                                       |               |                                 |                     |                                      |                                   |
|--------------------------------|--|---------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| hloubka řezu<br>( $a_p$ ) [mm] | průměr ( $a_e$ ) a<br>délka řezné části<br>nástroje [mm] | počet<br>zubů | řezná rychlost<br>$v_c$ [m/min] | posuv $f_n$<br>[mm] | velikost<br>posuvu $v_f$<br>[mm/min] | otáčky n<br>[ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 3,2                            | 10 x 30  | 10            | 100                             | 0,32                | 1018                                 | 3183                              |

#### Hodnocení testu číslo 4:

- Od počátku testu geometrie nevykazovala rozdílné (záběhové) řezné zvukové vlastnosti.
- Po obrobené dráze 5600 mm vzorek subjektivně vibruje, není ostrý zvuk.
- Zaznamenání defektu třech zubů v řezné části. Pro ucházející obrobený povrch obrobené dráhy se pokračovalo v testu.
- Velikost nedoříznutých vláken zde nebyl rozhodující parametr kvality. Do dráhy 5 600 mm byla stejná délka nedoříznutých vláken 0,5 mm a četnosti 4 vláken na 10 mm.
- Od dráhy 6300 mm změna délky vláken 1 mm a zvětšení délky vláken na výstupu nástroje z materiálu.

Test byl ukončen z důvodu vylomení zubu. Následkem zůstává stopa neobrobeného materiálu (výstupková plocha po celé délce vzorku). Konečná hodnota testu obrobené dráhy byla 8400 mm, což je doba trvanlivosti nástroje v řezu 8 min a 15s. Celý průběh testu frézování, ve kterém je vidět průběh nedoříznutých vláken, je v **příloze 3**.

**Test č. 5.** Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo frézování nástrojem od firmy Secotools o  $\varnothing$  d 10 mm. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm, který frézoval s přesahem v ose z 9 mm pod materiálem, bez chlazení a s odsáváním třísek. Řezné podmínky byly stanoveny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Secotools.

**Tab. 12: Parametry nástroje testu číslo 5.**

| nástroj                     | typ: 871100.0 DURA                                 |            |                              |                  |                                |                                  |
|-----------------------------|--|------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm] | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | počet zubů | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 3,2                         | 10 x 30  | 10         | 120                          | 0,26             | 993                            | 3819                             |

#### Hodnocení testu číslo 5:

- Od počátku testu geometrie nevykazovala rozdílné (záběhové) řezné zvukové vlastnosti.
- Velikost nedoříznutých vláken není rozhodující parametr kvality. Do dráhy 9800 mm stejná délka a četnost nedoříznutých vláken 0,3 mm. zvyšování pouze nedoříznutých vláken na výstupu z materiálu až 5 mm.



- Po 18 000 mm nastává vada vytahování bronzových vláken z matrice a jejich zpětné vlisování do materiálu.

Test byl ukončen z důvodu nedostatečné kvality obrobeného povrchu. Následkem obrábění zůstává na povrchu nástroje stopa tepelně ovlivněné oblasti modré barvy. Konečná hodnota testu obrobené dráhy byla 18200 mm, což je doba trvanlivosti nástroje v řezu 18 min a 19 s. Celý průběh testu frézování, ve kterém je vidět průběh nedoříznutých vláken, je v příloze 4.

### 3.2.3 Testy v materiálu termoplast

**Test č. 6:** Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo zkušební odladění otáček nástrojem Walter-tools o  $\varnothing$  d 8 mm o úhlu stoupání šroubovice  $30^\circ$  úhel čela  $15^\circ$ . Nástroj byl vyložen z upínače cca 30 mm, který frézoval s přesahem v ose z 4,5 mm pod materiálem, s chlazením a s odsáváním třísek. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Walter-tools.

**Tab. 13: Parametry pokusů nástroje testu číslo 6.**

|  |            |  |  |                              |                  |                                |                                  |
|---|------------|---|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Obrázek 3.14 Walter ø 8 mm  |            | Obrázek 3.15 čelo nástroje ø 8 mm   |  |                              |                  |                                |                                  |
|   | nástroj    | typ:3D1187-6329707  |  |                              |                  |                                |                                  |
| pokus   | počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm]   | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 1   | 5          | 4,5   | 8 x 20   | 300                          | 0,19             | 2268                           | 11936                            |
| 2   |            |   |  | 200                          | 0,15             | 1193                           | 7957                             |
| 3   |            |   |  | 200                          | 0,25             | 1989                           | 7957                             |
| 4   |            |   |  | 300                          | 0,3              | 3581                           | 11936                            |
| 5   |            |   |  | 300                          | 0,12             | 1432                           | 11936                            |



### Hodnocení testu jednotlivých pokusů po 350 mm:

- Při volbě řezných podmínek  $v_c$  300 m/min a  $f_n$  0,19 mm se tvoří velké množství tepla. Dochází ke spálení a zpětnému natavování třísky na materiál. Snížením řezných podmínek stále dochází k pálení špony.
- Průběhu pokusu číslo 3 a 4 nám na základě volby řezné rychlosti a posuvu vykazoval vysoký nepříjemný zvuk.

Test byl ukončen z důvodu zlomení frézy při řezu materiálu. Lom nastal vlivem zvýšení rychlosti posuvu o 10 % v oslabeném místě stopky chladicími kanály.



Obrázek 3.16 natavení materiálu



Obrázek 3.17 prachové třísky o velikosti 0,5 mm

**Test č. 7:** Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo zkušební odladění otáček nástrojem Walter-tools o  $\varnothing d$  8 mm o úhlu stoupání šroubovice 30° úhel čela 15°. Nástroj byl vyložen z upínače cca 30 mm, který frézoval s přesahem v ose z 4,5 mm pod materiálem, s chlazením a s odsáváním třísek. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Walter-tools.

**Tab. 14: Parametry pokusů nástroje testu číslo 7.**



Obrázek 3.18 Walter ø 8 mm



Obrázek 3.19 Upnutí v tepelném upínači HSK 63-A



|       | nástroj    | typ: prototypový výrobek bez označení s diamantovým povlakem |  |                              |                  |                                |                                 |
|-------|------------|--|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| pokus | počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm]                                  | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [min <sup>-1</sup> ] |
| 1     | 3          | 4,5  | 8 x 20   | 250                          | 0,075            | 746                            | 9947                            |
| 2     |            |  |  | 200                          | 0,072            | 572                            | 7957                            |
| 3     |            |  |  | 200                          | 0,096            | 763                            | 7957                            |
| 4     |            |  |  | 200                          | 0,12             | 954                            | 7957                            |
| 5     |            |  |  | 200                          | 0,136            | 1082                           | 7957                            |

### Hodnocení jednotlivých pokusů po 350 mm:

- V porovnání s testem 6 jsou lepší řezné vlastnosti vlivem šroubovice (čistší zvuk).
- Špatný otřep vlivem úhlu čela, fréza není dostatečně ostrá.
- Jemný prachový typ třísek a jejich velikost je stejná jako u testu číslo 6.
- Při testu  $v_c$  200 m/min a  $f_n$  0,136 mm vzniká vada stopy zubu po nástroji na povrchu obrobené plochy.

**Test č. 8:** Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo zkušební odladění otáček nástrojem Walter-tools o  $\varnothing$  d 12 mm o úhlu stoupání šroubovice  $4^\circ$  úhel čela  $7^\circ$ . Za účelem odzkoušení geometrie řezného nástroje, který byl vyložen z upínače cca 40 mm. Testovalo se za stálého chlazení a odsávání třísek s přesahem nástroje v ose z 4,5 mm pod materiál. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Walter-tools.

**Tab. 15: Parametry pokusů nástroje testu číslo 8.**

|   |  |  |  |   |  |  |  |
|---|--|--|--|---|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| Obrázek 3.20 Walter ø 12 mm   |  |  |  | Obrázek 3.21 čelo nástroje ø 12 mm  |  |  |  |

|       | nástroj    | typ: 66721000               |  |                              |                  |                                |                                |
|-------|------------|-----------------------------|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| pokus | počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm] | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky n [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 1     | 3          | 4,5                         | 12 x 20  | 200                          | 0,1              | 530                            | 5305                           |
| 2     |            |                             |  | 250                          | 0,15             | 994                            | 6631                           |
| 3     |            |                             |  | 300                          | 0,15             | 1193                           | 7957                           |
| 4     |            |                             |  | 360                          | 0,15             | 1432                           | 9549                           |
| 5     |            |                             |  | 360                          | 0,09             | 859                            | 9549                           |

### Hodnocení jednotlivých pokusů po 350 mm:

- Při pokusu číslo 1 nástroj volbou řezných podmínek vykazoval dobrý zvuk vlivem úhlu šroubovice.

- U pokusu 2 při zvýšení řezných podmínek byl stále dobrý zvuk. Vlivem úhlu čela vznikají velké otřepy na obrobku. Neobvyklý jevem u tažné šroubovice je vznik otřepů i na dolní straně vzorku.
- Z hlediska třísek se tento nástroj jeví jako vhodný, tříska se stáčí do sebe a nedochází ke zpětnému natavení.



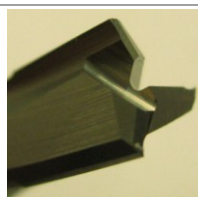
Obrázek 3.22 pokus 2 tvar třísek



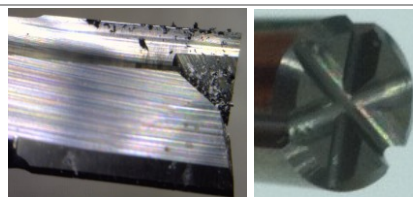
Obrázek 3.23 pokus 3 nedoříznutá vlákna

**Test č. 9:** Na základě zjištěných výsledků po testech 6, 7, 8 na nástrojích firmy Walter-tools byly vyrobeny nepovlakované nástroje za účelem dalšího zjištění řezivosti nástrojů. Na stroji Jobs LinX Compact se provádělo zkušební odladění otáček nástrojem Walter-tools o  $\phi$  d 8 mm. Za účelem odzkoušení geometrie řezného nástroje byl nástroj vyložen z upínače cca 40 mm. Frézovalo se za stálého chlazení a odsávání třísek s přesahem nástroje v ose z 2 mm pod materiál. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Walter.

**Tab. 16: Parametry pokusů nástroje testu číslo 9.**



Obrázek 3.24 Nástroj Walter-tools  $\phi$  8 mm

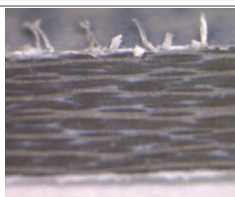


Obrázek 3.25 Použitý nástroj s procesními drážkami

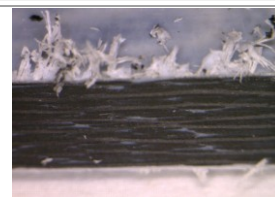
|       | nástroj    | typ:3D1167-6403622 (NEPOVLAKOVANÁ TAŽNÁ) |  |                              |                  |                                |                                  |
|-------|------------|--|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| pokus | počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm]              | průměr ( $a_c$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 1     | 3          | 4,5                                      | 8 x 8  | 300                          | 0,14             | 1671                           | 11936                            |
| 2     |            |  |  | 360                          | 0,14             | 2005                           | 14324                            |
| 3     |            |  |  | 240                          | 0,14             | 1336                           | 9549                             |
| 4     |            |  |  | 240                          | 0,18             | 1718                           | 9549                             |
| 5     |            |  |  | 240                          | 0,216            | 2062                           | 9549                             |

### Hodnocení pokusů po 350 mm:

- Při pokusu číslo 2 je volba řezných podmínek nevyhovující, nástup vibrací.
- U pokusu 3 snížením řezných podmínek dochází ke zklidnění, subjektivně lepší než pokus číslo 1.
- Z hlediska třísek se tento nástroj jeví jako vhodný, tříska se stáčí do sebe, nedochází ke zpětnému natavení.
- Nedoříznutá vlákna byly nejlépe ohodnoceny v pokusu číslo 3. V pokusu číslo 5 už jsou v délce do 2 mm.

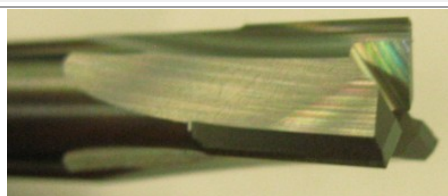


Obrázek 3.26 pokus 3 boční pohled

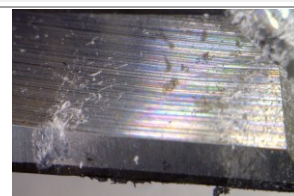


Obrázek 3.27 pokus 5 boční pohled

**Test č. 10:** Nástroj je podobný jako při testu č. 8. Na první pohled je rozdíl v přívodu lineárních řezných drážek pro chlazení za břit. Geometrický rozdíl zná pouze výrobce. Zkušební odladění otáček nástrojem Walter-tools o  $\varnothing$  d 8 mm se provádělo na stroji Jobs LinX Compact. Za účelem odzkoušení geometrie řezného nástroje byl nástroj vyložen z upínače cca 40 mm. Testovalo se za stálého chlazení a odsávání třísek s přesahem nástroje v ose z 2 mm pod materiál. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Walter-tools.



Obrázek 3.28 nástroj Walter  $\varnothing$  8 mm



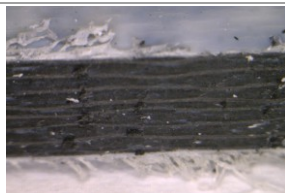
Obrázek 3.29 Použitý nástroj Walter

**Tab. 17: Parametry pokusů nástroje testu číslo 10.**

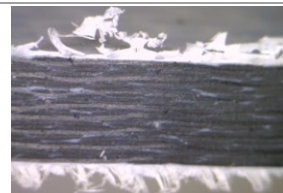
|       | nástroj    | typ:3D1167-6403621 (NEPOVLAKOVANÁ TAŽNÁ) |  |                              |                  |                                |                                  |
|-------|------------|--|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| pokus | počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm]              | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 1     | 3          | 4,5                                      | 8 x 8  | 240                          | 0,14             | 1336                           | 9549                             |
| 2     |            |  |  | 240                          | 0,168            | 1604                           | 9549                             |
| 3     |            |  |  | 400                          | 0,105            | 1671                           | 15915                            |
| 4     |            |  |  | 240                          | 0,216            | 2062                           | 9549                             |

### Hodnocení pokusů po 350 mm:

- Volba řezných podmínek pokusu 1 byla zvolena na základě nejvhodnějšího pokusu z testu číslo 9. Nástroj frézuje bez zjevných závad a s minimálním otřepem po obrábění.
- U pokusu číslo 3 došlo k natavení třísek za frézou.
- U pokusu číslo 4 byl zvětšen posuv, to způsobilo větší otřep na obrobku.
- Z hlediska třísek se tento nástroj jeví jako vhodný, tříska se stáčí do sebe a nedochází ke zpětnému natavení.



Obrázek 3.30 pokus 1 boční pohled



Obrázek 3.31 pokus 4 boční pohled

### Test č. 11:

Provádělo se zkušební odladění otáček nástrojem Secotools o  $\varnothing d$  8 mm na stroji Jobs LinX Compact. Účelem bylo odzkoušení geometrie řezného nástroje. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm. Testovalo se za stálého chlazení a odsávání třísek s přesahem nástroje v ose z 3 mm pod materiálem. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Secotools.



**Tab. 18: Parametry pokusů nástroje testu číslo 11.**

|   |            |  |  |                              |                  |                                |                                  |
|---|------------|--|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
|  |            |  |  |                              |                  |                                |                                  |
| Obrázek 3.32 JC 871 Nepovlakovaný   |            | Obrázek 3.33 JC 871 použitý  |  |                              |                  |                                |                                  |
|   | nástroj    | typ: 871080.0 jemná  |  |                              |                  |                                |                                  |
| pokus   | počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm]  | průměr ( $a_e$ ) a délka řezní části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 1   | 8          | 4,5  | 8 x 24   | 170                          | 0,2              | 1352                           | 6764                             |
| 2   |            |  |  | 120                          | 0,1              | 477                            | 4774                             |

### Hodnocení jednotlivých pokusů po 1050 mm:

- V 1 pokusu dochází k výrazným vibracím nástroje. Při snížení řezných podmínek je nástroj vlivem tepla zalepen a není schopen obrábět. Dochází k natavování třísek zpět na materiál doprovázený výrazným tónem zvuku.


Geometrie frézy není vhodná pro obrábění v termoplastu. Na základě poznatků byl test ukončen po 2100 mm.

|   |  |
|---|--|
|  |  |
| Obrázek 3.34 frézovaný vzorek nástrojem Seco JC 871                                 | Obrázek 3.35 pokus 2 zpětné nalepení třísek  |


### Test č. 12:

Provádělo se zkušební odladění otáček nástrojem Secotools o  $\varnothing d$  8 mm na stroji Jobs LinX Compact. Účelem bylo odzkoušení geometrie řezného nástroje. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm. Testovalo se za stálého chlazení a odsávání třísek s přesahem nástroje v ose  $z$  3 mm pod materiál. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Seco.

**Tab. 19: Parametry pokusu nástroje testu číslo 12.**



Obrázek 3.36 JC 880



Obrázek 3.37 JC 880 použitý

|            |                             |  |                              |                  |                                |                                  |
|------------|-----------------------------|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| nástroj    | typ: 880080R020Z4.0 - DURA  |  |                              |                  |                                |                                  |
| počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm] | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 4          | 4,5                         | 8 x 24   | 100                          | 0,2              | 795                            | 3978                             |

### Hodnocení:

- nástroj pracuje správně, tichým řezem v materiálu,
- otřep se tvoří na horní hraně o délce 1 mm.

Test byl přerušen po 6300 mm pro nedostatek vzorků. Celý průběh testu frézování, ve kterém je vidět počet obrobených vzorků, je v **příloze 5**.

### Test č. 13:

Provádělo se zkušební odladění otáček nástrojem Secotools o  $\varnothing d$  8 mm na stroji Jobs LinX Compact. Účelem bylo odzkoušení geometrie řezného nástroje. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm. Testovalo se bez chlazení za odsávání třísek s přesahem nástroje v ose z 3 mm pod materiál. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Secotools.

**Tab. 20: Parametry pokusu nástroje testu číslo 13.**

Obrázek 3.38 A0B255/1

Obrázek 3.39 A0B255/1 použitý

|            |                             |  |                              |                  |                                |                                  |
|------------|-----------------------------|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| nástroj    | typ: A0B 255/1 - DURA       |  |                              |                  |                                |                                  |
| počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm] | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 2          | 4,5                         | 8 x 20   | 100                          | 0,2              | 795                            | 3978                             |

### Hodnocení:

- obrobené vzorky byly téměř bez otřepu,
- kvalitní povrch,
- z důvodu nepoužití vnitřního chlazení došlo k lehkému natavení, které by se chlazením odstranilo.

Test byl přerušen po 6300 mm pro nedostatek vzorků. Celý průběh testu frézování, ve kterém je vidět počet obrobených vzorků, je v **příloze 6**.



### Test č. 14:

Provádělo se zkušební odladění otáček nástrojem Secotools o  $\varnothing d$  8 mm na stroji Jobs LinX Compact. Účelem bylo odzkoušení geometrie řezného nástroje. Nástroj byl vyložen z upínače cca 40 mm. Testovalo se za stálého chlazení a odsávání třísek s přesahem nástroje v ose  $z$  3 mm pod materiál. Řezné podmínky testu byly zvoleny za spolupráce aplikačního technika nástrojů firmy Secotools.

**Tab. 21: Parametry pokusu nástroje testu číslo 14.**

Obrázek 3.40 nástroj JPD 890

Obrázek 3.41 Použitý nástroj JPD 890

|            |                              |  |                              |                  |                                |                                  |
|------------|------------------------------|--|------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| nástroj    | typ: JPD 890080E2S.OZ2A DURA |  |                              |                  |                                |                                  |
| počet zubů | hloubka řezu ( $a_p$ ) [mm]  | průměr ( $a_e$ ) a délka řezné části nástroje [mm] | řezná rychlost $v_c$ [m/min] | posuv $f_n$ [mm] | velikost posuvu $v_f$ [mm/min] | otáčky $n$ [ $\text{min}^{-1}$ ] |
| 2          | 4,5                          | 8 x 15   | 600                          | 0,16             | 3819                           | 23873                            |

### Hodnocení:

- rychlý proces,
- kvalitní povrch.

Při pokusu simulace upnutí skutečného dílu (uvolnění vzorku v přípravku z jedné strany), došlo při obrábění vzorku k silným vibracím a výraznému otřepu. Za těchto podmínek musel být proces zastaven. Hrozilo zlomení nástroje, nebo vyštípnutí připájené řezné PKD destičky, která je velice tvrdá ale křehká. Celý průběh testu frézování, ve kterém je průběh obrobených vzorků, je v **příloze 7**.

## 4 Technicko – ekonomické zhodnocení

Pro hodnocení procesu obrábění komponentů z reaktoplastu a termoplastu byla použita metoda solidního logického rozboru v kombinaci s intuitivním přístupem a s využitím zkušeností získaných dlouhodobým sledováním výrobního procesu. Kvalita povrchu po obrobení byla hodnocena vizuální metodou, která je nejstarší a nejběžnější formou nedestruktivní kontroly v letectví. Dále se tato práce zaměřuje na optimalizaci současného stavu procesu obrábění termoplastu. U obou případů je snaha o zkrácení výrobního taktu stroje, nebo i delší trvanlivosti nástroje, a tím navýšení počtu vyrobených dílů potahového panelu, což povede přímo ke snížení nákladů na jeden díl.

### 4.1 Reaktoplast

Na základě typu stroje (jeho délky pracovního stolu) a jeho možností předpřípravy dalších dílů na obrábění neuvažujeme cenu vedlejších nákladů na práci (upnutí a uvolnění obrobku), tzn. čas stroje, který by stál po dobu výměny obrobku.

**Příklad:** výpočtu otáček a posuvu:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{d \cdot \pi} = \frac{148 \cdot 1000}{10 \cdot 3,14} = 4711 \text{ min}^{-1} \quad (4.1)$$

$$v_f = f_n \cdot n = 0,19 \cdot 4711 = 890 \text{ mm/min} \quad (4.2)$$

**Tab. 22: Vstupující hodnoty.**

|                                | <b>stávající<br/>Walter</b> | <b>test 2<br/>Walter</b> | <b>test 3<br/>Walter</b> | <b>test 4<br/>Seco</b> | <b>test 5<br/>Seco</b> |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| průměr frézy d [mm]            | 10                          | 10                       | 10                       | 10                     | 10                     |
| řezná rychlost $v_c$ [m/min]   | 148                         | 148                      | 148                      | 100                    | 120                    |
| posuv na zub $f_n$ [mm]        | 0,19                        | 0,19                     | 0,19                     | 0,32                   | 0,26                   |
| otáčky n [ $\text{min}^{-1}$ ] | 4711                        | 4711                     | 4711                     | 3183                   | 3819                   |
| posuv $v_f$ [mm/min]           | 890                         | 890                      | 890                      | 1018                   | 993                    |
| délka L [mm]                   | 9300                        | 9800                     | 7000                     | 8400                   | 18200                  |
| cena nástroje $N_{cn}$ [Kč]    | 2300                        | 2300                     | 2300                     | 2400                   | 2400                   |
| čas testu $t_{AS}$ [min]       | 10,4                        | 11,0                     | 7,9                      | 8,3                    | 18,3                   |

**Příklad:** původní technologie obrábění -vycházíme ze vzorce  $N_c$ :

$$N_c = N_s + N_v + N_{nv} \quad (4.3)$$

$$l_{nf} = \sqrt{H(D - H)} = \sqrt{10(10 - 10)} = 0 \quad (4.4)$$

$$L = l + l_n + l_p + l_{nf} = 655 + 1230 + 1095 + 6300 + 4 \cdot (2 + 3) = 9300 \text{ mm} \quad (4.5)$$

Zvolená délka L1 pro porovnání nástrojů = 1000 mm

$$v_f = 890 \text{ [mm/min]}$$

Potřebované množství nástroje N na 1000 mm řezu:

$$N = \frac{L1}{L} = \frac{1000}{9300} = 0,11 \text{ ks} \quad (4.6)$$

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{1000}{890} = 1,12 \text{ min} \quad (4.7)$$

$$N_{sm} = 3000 \text{ Kč/h.} = 50 \text{ Kč/min.} \quad (4.8)$$

$$N_{cn} = 2300 \text{ Kč}$$

$$N_s = t_{AS} \cdot N_{sm} = 1,12 \cdot 50 = 56 \text{ Kč} \quad (4.9)$$

$$N_{nv} = \frac{N}{Cn} = \frac{0,11}{2300} = 247 \text{ Kč} \quad (4.10)$$

$$N_v = 0 \text{ Kč}$$

$$N_{cm} = N_s + N_v + N_n = 56 + 0 + 247 = 303 \text{ Kč} \quad (4.11)$$

**Tab. 23: Výsledky testů porovnání nákladů na 1 metr frézování.**

|   | <b>stávající<br/>Walter</b> | <b>test 2<br/>Walter</b> | <b>test 3<br/>Walter</b> | <b>test 4<br/>Seco</b> | <b>test 5<br/>Seco</b> |
|---|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| délka skutečná L [mm]                     | 9300                        | 9800                     | 7000                     | 8400                   | 18200                  |
| délka zvolená L1 [mm]                     | 1000                        | 1000                     | 1000                     | 1000                   | 1000                   |
| posuv $v_f$ [mm]                          | 890                         | 890                      | 890                      | 1018                   | 993                    |
| nástroj na 1000 mm řezu [ks]              | 0,11                        | 0,10                     | 0,14                     | 0,12                   | 0,05                   |
| čas na metr řezu $t_{AS}$ [min]           | 1,12                        | 1,12                     | 1,12                     | 0,98                   | 1,01                   |
| náklady na minutu stroje $N_{sm}$ [Kč]    | 50                          | 50                       | 50                       | 50                     | 50                     |
| cena nástroje $C_n$ [Kč]                  | 2300                        | 2300                     | 2300                     | 2400                   | 2400                   |
| náklady stroje na 1000 mm řezu $N_s$ [Kč] | 56                          | 56                       | 56                       | 49                     | 50                     |

|  |            |            |            |            |            |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| náklady nástroje na 1000 mm řezu<br>$N_{nv}$ [Kč]              | 247        | 235        | 329        | 286        | 132        |
| náklady na vedlejší práci $N_v$ [Kč]                           | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| <b>náklady na 1 metr frézování <math>N_{cm}</math></b><br>[Kč] | <b>303</b> | <b>291</b> | <b>385</b> | <b>335</b> | <b>182</b> |

**Pozn.:** Vzhledem k naprogramování nástrojových drah na skutečném dílci můžeme prohlásit test výsledků 2, 3, 4, že odpovídá 1 obrobenému dílu a test 5 odpovídá 2 dílům.

Vzorce pro výpočet nákladů frézování na 1 díl:

$$N_{sk} = N_s \cdot t_{AS} \cdot 9,3 = 56,2 \cdot 1,124 \cdot 9,3 = 587 \text{ Kč} \quad (4.12)$$

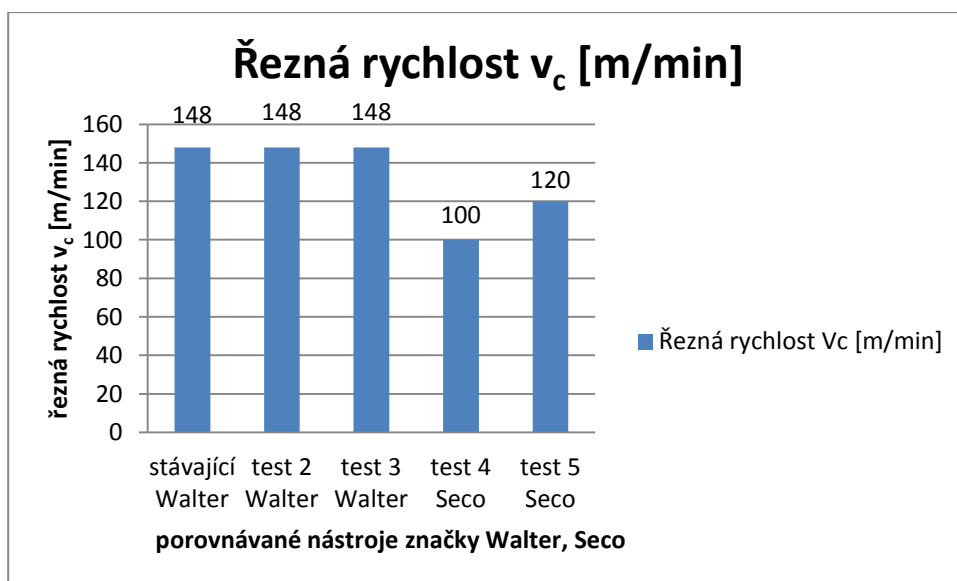
$$N_{nv} = 2300 \text{ Kč} \quad (4.13)$$

$$N_c = N_s + N_v + N_{nv} = 587 + 0 + 2300 = \mathbf{2887 \text{ Kč}} \quad (4.14)$$

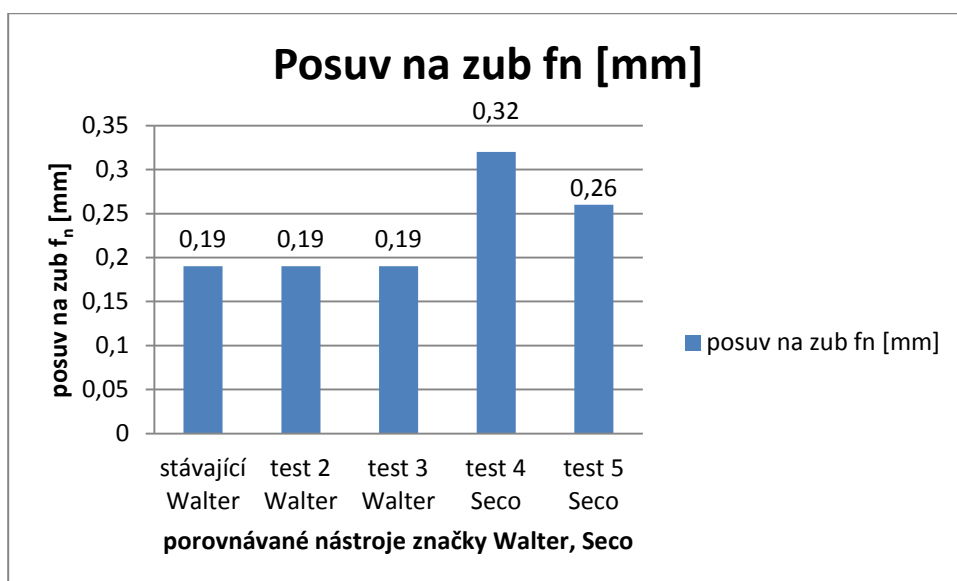
**Tab. 24: Výsledky testů porovnání nákladů na počet dílů jedním nástrojem.**

|  | <b>stávající<br/>Walter</b> | <b>test 2<br/>Walter</b> | <b>test 3<br/>Walter</b> | <b>test 4<br/>Seco</b> | <b>test 5<br/>Seco</b> |
|--|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| počet dílů   | 1                           | 1                        | 1                        | 1                      | 2                      |
| délka skutečná L [mm]  | 9300                        | 9300                     | 9300                     | 9300                   | 18600                  |
| posuv $v_f$ [mm]   | 890                         | 890                      | 890                      | 1018                   | 993                    |
| čas na metr řezu $t_{AS}$ [min]                                | 1,12                        | 1,12                     | 1,12                     | 0,98                   | 1,01                   |
| náklady na minutu stroje $N_{sm}$ [Kč]                         | 50                          | 50                       | 50                       | 50                     | 50                     |
| náklady stroje na 1000 mm řezu<br>$N_s$ [Kč]                   | 56                          | 56                       | 56                       | 49                     | 50                     |
| cena nástroje $C_n$ [Kč]                                       | 2300                        | 2300                     | 2300                     | 2400                   | 2400                   |
| náklady stroje vztažené na jeden<br>díl $N_{sk}$ [Kč]          | 587                         | 587                      | 587                      | 448                    | 472                    |
| náklady nástroje vztažené na<br>jeden díl $N_{nv}$ [Kč]        | 2300                        | 2300                     | 2300                     | 2400                   | 1200                   |
| <b>náklady frézování dílu celkem<br/><math>N_c</math> [Kč]</b> | <b>2887</b>                 | <b>2887</b>              | <b>2887</b>              | <b>2848</b>            | <b>1672</b>            |

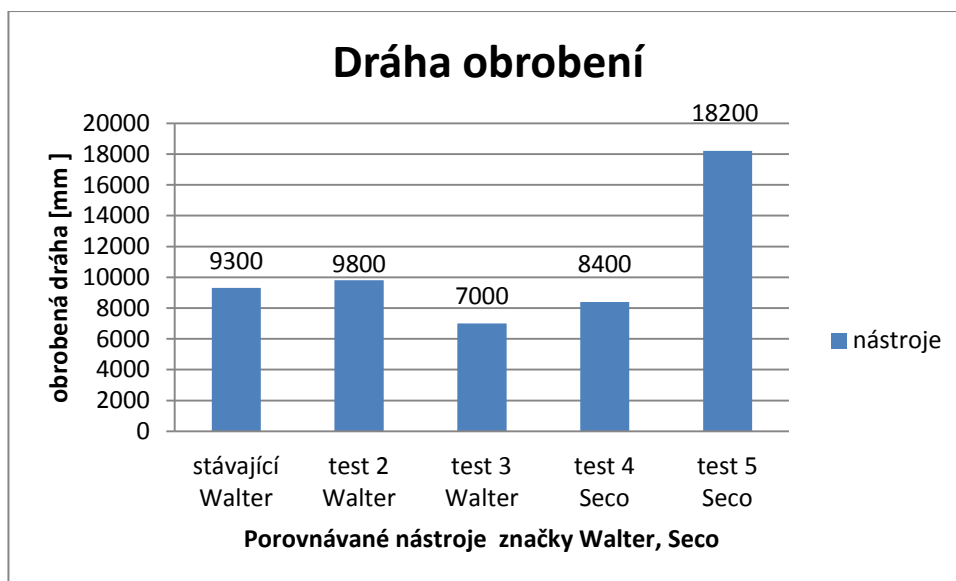
**Graf 2: Řezných rychlostí.**



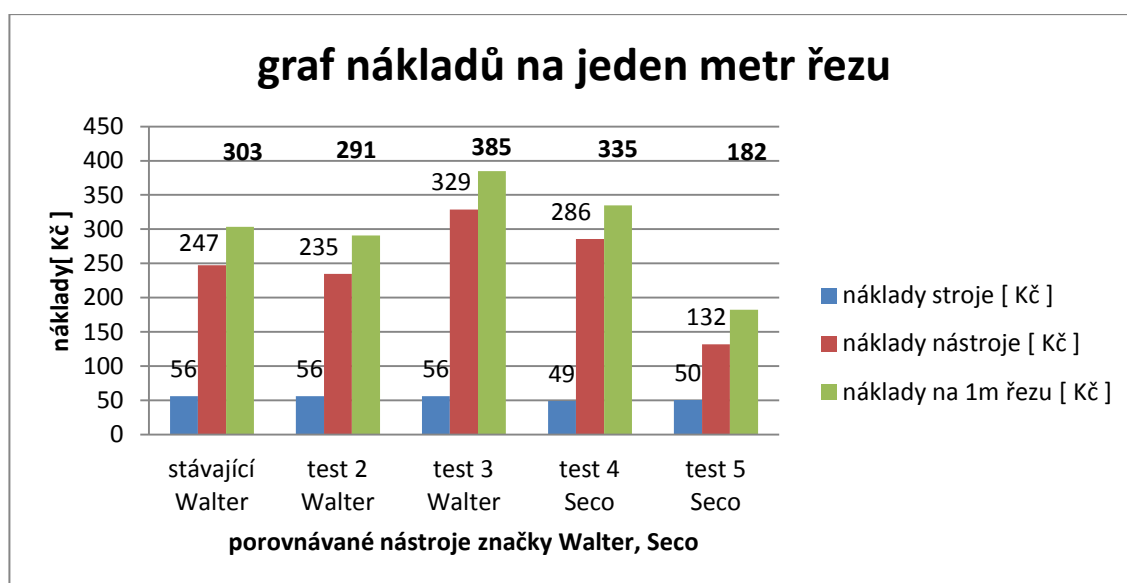
**Graf 3: Posuvů na zub.**



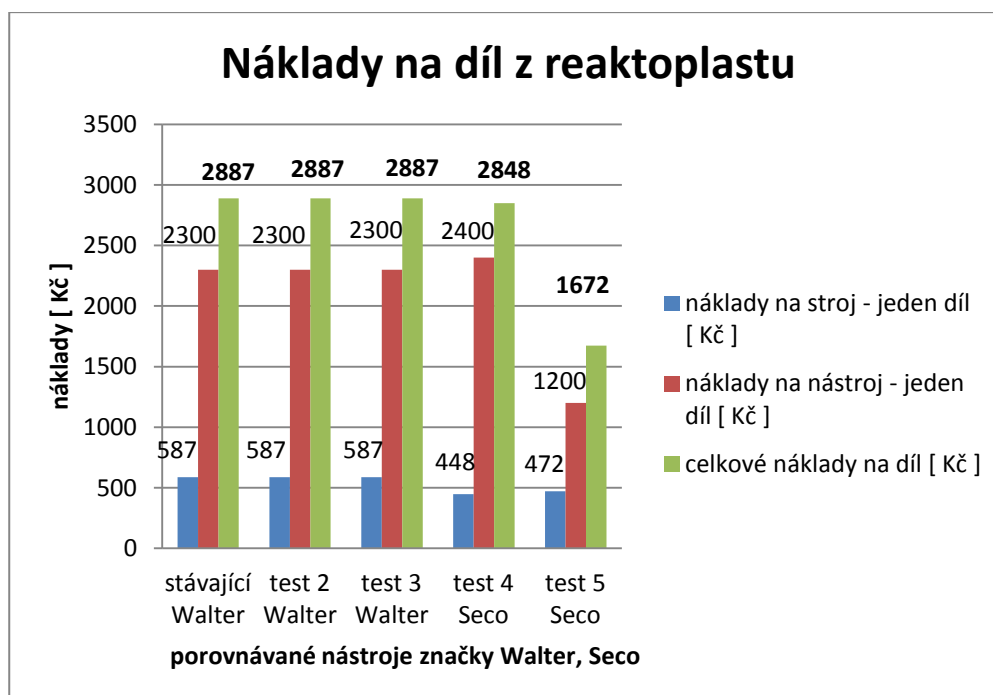
**Graf 4: Délka celkové obrobené dráhy v testu.**



**Graf 5: Celkové náklady na obrobený metr řezu za minutu.**



**Graf 6: Náklady na obrobený díl z reaktoplastu.**



### Shrnutí Reaktoplastu:

Nástroje byly testovány ve vzorku materiálu za konstantní hloubky ve třech osách. Při obrábění reálného díle dochází k proměnlivým hloubkám vlivem technologické potřeby naprogramovaných drah obrábění v pěti osách. Z toho vyplývá, že nástroje vydrží déle a tím by došlo ke zlevnění jejich nákladů. Použitím nástroje Secotools a řezných podmínek z testu pět lze vyhodnotit teoretickou úsporu 1215 Kč na jednom výrobku u řešeného frézovaného cyklu.

Operace frézování reaktoplastového dílu je omezena výměnou nástroje během obráběného cyklu, který je 9 300 mm. Na základě délek obrobených drah nástrojů při testech nejdéle řezal nástroj firmy Secotools za technologických podmínek z testu číslo pět 18 200 mm. Za blíže nespecifikované proměnné hloubky nástroje je doporučení pokračovat ve zkoušce tímto nástrojem ve skutečném díle za řezných podmínek z testu číslo pět. Očekává se výdrž tohoto nástroje potřebných 18 600 mm na dva celé dílce. Což vede k dvakrát větší trvanlivosti za zrychlení technologického cyklu o 61 sekund na frézovaném díle ve srovnání s původní technologií.

## 4.2 Termoplast

V termoplastovém materiálu byly u nástrojového testu provedeny pokusy řezných podmínek. Posudek trvalnosti nástroje z výsledků vhodných nástrojů je dalším námětem testů pro časovou náročnost.

### Shrnutí Termoplastu:

#### Test 6 Walter-tools

Pětizubý prototypový nástroj průměru 8 mm nejlépe obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 200$  m/min a  $f_n = 0,15$  mm. Tato fréza je nevhodná pro obrábění termoplastu pro malou zubovou mezeru, nízký úhel šroubovice a tím vznik velkého tření.

#### Test 7 Walter-tools

Třízubý prototypový nástroj průměru 8 mm nejlépe obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 200$  m/min a  $f_n = 0,12$  mm. Tato fréza je nevhodná pro obrábění termoplastu.

#### Test 8 Walter-tools

Třízubý nástroj průměru 12 mm nejlépe obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 300$  m/min a  $f_n = 0,15$  mm. Tato fréza je nevhodná pro obrábění termoplastu. Geometrie nástroje není dostatečně ostrá a zůstávají nedoříznutá vlákna po obou stranách materiálu.

#### Test 9 Walter-tools

Třízubý prototypový nástroj průměru 8 mm nejlépe obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 240$  m/min a  $f_n = 0,14$  mm. Geometrie nástroje podobná jako v testu číslo 10.

#### Test 10 Walter-tools

Třízubý prototypový nástroj průměru 8 mm nejlépe obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 200$  m/min a  $f_n = 0,16$  mm. Geometrie třízubé frézy je vhodná pro napovlakování a trvanlivostní test obrábění v termoplastu.

#### Test 11 Secotools

Jemnozubý nástroj typu JC 871 průměru 8 mm. Obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 120$  m/min a  $f_n = 0,1$  mm. Tato fréza je nevhodná pro obrábění termoplastu, kde vlivem malé zubové mezery dochází k zalepení nástroje.



### Test 12 Secotools

Čtyřzubý nástroj typu JC 880 průměru 8 mm. Obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 100$  m/min a  $f_n = 0,2$  mm. Tato fréza je vhodná pro trvanlivostní test obrábění v termoplastu. Cena nástroje je 2600 Kč.

### Test 13 Secotools

Speciální dvouzubý nástroj typu A0B255/1 o průměru 8 mm. Obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 100$  m/min a  $f_n = 0,2$  mm. Tato fréza je vhodná pro trvanlivostní test obrábění v termoplastu. Cena nástroje je přibližně 4000 Kč.

### Test 14 Secotools

Dvouzubý nástroj typu JPD 890 (PKD plátky) o průměru 8 mm. Obráběl za řezných podmínek při  $v_c = 600$  m/min a  $f_n = 0,16$  mm. Tato fréza je vhodná pro trvanlivostní test obrábění v termoplastu. Avšak při obrábění ve výrobním díle materiálu hrozí vyštípnutí z důvodu možných vibrací (vlivem upevnění) a křehkosti plátku. Cena nástroje je 6700 Kč.

Na základě velkého množství testů a pokusů v termoplastu je v tabulce 25 přehledné shrnutí výsledku nejvhodnějších řezných parametrů a hodnocení nástrojů.

**Tab. 25: Hodnocení nástrojů v termoplastu.**

|         | Řezná rychlost<br>$v_c$<br>[m/min] | Posuv na<br>otáčku $f_n$ [mm] | hodnocení nástroje pro<br>obrábění výrobního dílu |
|---------|------------------------------------|-------------------------------|---|
| test 6  | 200                                | 0,15                          | nevhodný  |
| test 7  | 200                                | 0,12                          | nevhodný  |
| test 8  | 300                                | 0,15                          | nevhodný  |
| test 9  | 240                                | 0,14                          | vhodný  |
| test 10 | 240                                | 0,16                          | vhodný  |
| test 11 | 120                                | 0,2                           | nevhodný  |
| test 12 | 100                                | 0,2                           | vhodný  |
| test 13 | 100                                | 0,2                           | vhodný  |
| test 14 | 600                                | 0,16                          | nevhodný  |

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo zefektivnění výrobní technologie obráběním kompozitových dílů. Byly porovnávány dva nejvhodnější typy nástrojů na obrábění kompozitu od konkurenčních firem Walter-tools a Secotools. Řezné parametry byly voleny z doporučení aplikačních techniků na základě zkušeností a vizuální kontroly výsledku pokusů. Výsledků bylo dosaženo za použití matematické metody minimálních výrobních nákladů. Zadaným podmínkám nejlépe odpovídá test číslo pět. Toto zjištění je podloženo grafy a obrázky. Doporučení pro trvanlivostní zkoušku obrábění termoplastu je použit nástroj z testu číslo dvanáct na základě jeho typizace. Cena nástroje představuje významnou roli v celkových ekonomických nákladech při obrábění kompozitu.

Na základě zkoušek můžeme říci obecné zásady pro frézování reaktoplastů s uhlíkovými vlákny, že jsou vhodnější nástroje s větším počtem zubů děleného ostří. Materiály vyztužené uhlíkovými vlákny a vrstvou vláken bronzových jsou tak lépe děleny. Dochází tím k vytvoření krátké jemné prachové třísky, která výrazně neovlivňuje obráběný materiál vlivem vad delaminace obrobeného povrchu a naopak zamezení vytahování vláken z materiálu. Zásadami pro frézování termoplastu je používání nástrojů s menším počtem zubů. Vyhovovaly nástroje zpravidla s dvěma až čtyřmi zuby ostrého břitu a vhodněji kladným úhlem šroubovice. Struktura nástroje ze slinutého karbidu pro jeho houževnatost. Povrch nástroje je napovlakován diamantem za účelem nižšího opotřebení. Povlakovaný nástroj je dražší, ale v celkovém nákladovém důsledku je ekonomicky výhodnější. Dále měl nástroj velkou zubovou mezeru, ve které je přivedeno vnitřní nebo vnější chlazení vzduchu. Vzniká tím lepší tvar třísek, nedochází k jejich zpětnému natavení a vyššímu tepelnému zatížení, které by vedlo k degradaci materiálu.

Výrobní podniky zaměřené na obrábění kompozitu vytváří tlak na výrobce nástrojů, aby nastavení technologických podmínek frézování vedlo k co nejlepší kvalitě výrobků za současného snižování výrobních nákladů. Dalším požadavkem je zrychlení řezných podmínek, nebo delší životnost nástroje. Na základě dosažených výsledků s ohledem na nové poznatky v oblasti obrábění kompozitních materiálů lze očekávat tuto výzkumnou práci:

- Trvanlivostní test obrábění termoplastu vybranými nástroji a následné ekonomické zhodnocení.

## **Poděkování**

Děkuji tímto firmě LETOV LETECKÁ VÝROBA s.r.o., panu ing. Vladislavu Tůmovi a ing. Aleši Hartmanovi za poskytnuté podklady, cenné rady a připomínky ke zpracování. Dále bych chtěl poděkovat vedoucí diplomové práce paní Ing. et Ing. Mgr. Janě Petrů, Ph.D. za odborné vedení při vypracování této diplomové práce.

## Seznam použité literatury

1. J. PAULO DAVIM. *Machining Composite Materials*. London SW 19 4EU: ISTE Ltd, 2010. ISBN 978-1-84821-170-4.
2. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praxe*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6
3. ZHANG, H., CHEN, W., CHEN, D., ZHANG, L. Assessment of the Exit Defects in Carbon Fibre-Reinforced Plastic Plates Caused by Drilling. *Key Engineering Materials*. 2001, Vol. 196, pp. 43-52. ISSN 1013-9826.
4. *MM Průmyslové spektrum*. Praha 10: MM publishung, s.r.o., 2/2013. ISSN 12122572.
5. SEDLÁČEK, Jan. *EFEKTIVNÍ Obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. Brno, 2010. Disertační práce. VUT Brno.
6. *MECHANIKA KOMPOZITŮ* [online]. Brno, 2008 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=52474](http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52474)
7. *MECHANIKA KOMPOZITŮ* [online]. 2012 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
8. *Kompozitní materiály* [online]. Ústí nad Labem, 2008 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: [http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy\\_II/kompozitni\\_materialy.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf)
9. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2003. 138 stran. [online]. [cit. 15. Března 2013]. Dostupné na www: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>.

10. Technologie obrábění. *Http://www.czspos.cz/* [online]. 2011 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: [http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/24\\_technologie\\_obrazeni.pdf](http://www.czspos.cz/akce/20100225.emo2009/24_technologie_obrazeni.pdf)
11. GUINAUDEAU, Antony. SECOTOOLS. *Kompozity*. Warsaw, 10.2011.
12. MIKULA, Martin. *KOMPOZITNÍ MATERIÁLY NA BÁZI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=54627](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54627).  
Bakalářská práce. VUT Brno.
13. TRÍSKA, Václav. NEDESTRUKTIVNÍ KONTROLA KOMPOZITOVÝCH POTAHOVÝCH PANELŮ LETOUNŮ. In: *Http://www.ndt.net/* [online]. 2010 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/defektoskopie2009/papers/Triska-8.pdf>
14. CABRNOCH, Bohuslav. *TRANSFER* [online]. 2012 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/rocnik-2012>
15. Opatření břitů nástrojů ze slinutých karbidů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 1 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2.html>
16. Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, č. 7 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
17. Zemčík, O. *Speciální technologie – Optimalizace ve strojírenské technologii*. Studijní opory pro bakalářskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2009
18. Technologie obrábění po skandinávsku. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, č. 9 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-obrazeni-po-skandinavsku.html>

19. HUMÁR, Antonín. *Technologie obrábění I – část 1*. Brno, 2003. Dostupné z: [http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/Technologie%20I/TI\\_TO-1cast.pdf](http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/Technologie%20I/TI_TO-1cast.pdf). Studijní opory pro magisterskou formu studia. Vut Brno.
20. HUMÁR, Antonín. *Technologie obrábění I - část 2*. Brno, 2004. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-2cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf). Studijní opory pro magisterskou formu studia. Vut Brno.
21. Obrábět kompozity je umění. *Technický týdeník* [online]. 2013, č. 1 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/obrabet-kompozity-je-umeni\\_20078.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/obrabet-kompozity-je-umeni_20078.html)
22. *Mechanické opotřebení* [online]. [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/2.html>
23. DVOŘÁK, Zdeněk a Romana LAMBOROVÁ. *ZÁKLADY VÝROBNÍCH PROCESŮ I* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: [http://web.ft.utb.cz/cs/docs/T1PR\\_konstrukci\\_materialy\\_polymerni.pdf](http://web.ft.utb.cz/cs/docs/T1PR_konstrukci_materialy_polymerni.pdf) Elektronická publikace. UNIVERZITA Tomáše Bati ve Zlíně.
24. Tepelné upínání. *DEK TECHNIK spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.tepelneupinani.cz/upinace/>
25. Kompozity s termoplastovou matricí. In: KŘENA, Josef. [Http://www.csm-kompozity.wz.cz](http://www.csm-kompozity.wz.cz) [online]. 2009 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/kompozity.pdf>
26. Jobs Compact. [www.jobs.it](http://www.jobs.it) [online]. 2005 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.jobs.it/jobs2011/eng/aerospace?ct=1365842991859>
27. JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů* [online]. Brno, 1999 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:-qOYiQWC04AJ:wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%2520-%2520Uvod%2520do%2520materialoveho%2520inzenyrstvi%2520kompozitu/skripta\\_1.doc+&cd=1&hl=en&ct=clnk](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:-qOYiQWC04AJ:wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/files/verejny/MVD/Jancar%2520-%2520Uvod%2520do%2520materialoveho%2520inzenyrstvi%2520kompozitu/skripta_1.doc+&cd=1&hl=en&ct=clnk). Publikace. ÚCHM FCH VUT Brno.

## **Přílohy**

### **Seznam příloh**

**Příloha 1:** obrábění reaktoplastu v průběhu testu 2 nástrojem od firmy Walter-tools Ø 10 mm.

**Příloha 2:** obrábění reaktoplastu v průběhu testu 3 nástrojem od firmy Walter-tools Ø 10 mm.

**Příloha 3:** obrábění reaktoplastu v průběhu testu 4 nástrojem od firmy Secotools Ø 10 mm.

**Příloha 4:** obrábění reaktoplastu v průběhu testu 5 nástrojem od firmy Secotools Ø 10 mm.

**Příloha 5:** obrábění termoplastu v průběhu testu 12 nástrojem od firmy Secotools Ø 8 mm.

**Příloha 6:** obrábění termoplastu v průběhu testu 13 nástrojem od firmy Secotools Ø 8 mm.

**Příloha 7:** obrábění termoplastu v průběhu testu 14 nástrojem od firmy Secotools Ø 8 mm.

**Příloha 8:** obráběcí stroj.

